

СОВЕРШЕННО СЕКРЕТНО

Экземпляр № 1 из 3

ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория криптографических протоколов и распределённых систем

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Института перспективных
цифровых исследований

(подпись, фамилия)

«_____» _____ 2025 г.

Отчёт НИР № АЭ-402/2025

УДК 004.75:336.748

Инв. № _____

ПРОТОКОЛ АЕХ-402

Агентный обменный протокол

К вопросу об автономной инфраструктуре
ликвидности для экономики x402

Теоретические основания и исследовательская программа
адаптивного маркетмейкинга с обучением с подкреплением

Рин Фензиг
Лаборатория OpenSVM
research@opensvm.com

25 декабря 2025 г.

Примечание: В настоящем отчёте строго разграничиваются доказанные результаты (Теоремы, Утверждения) и направления исследований (Гипотезы, Открытые задачи). Описание интеграции с x402 представляет собой проектные предложения, а не отчёт о реализованных системах.

Аннотация

Настоящая работа представляет АЕХ-402 — теоретическую основу для автономного маркетинга, предназначенную для формирующейся агентной экономики. По мере того как автономные экономические агенты (АЭА¹) всё активнее совершают транзакции посредством протоколов А2А и х402, им требуется инфраструктура ликвидности с такими свойствами, которые существующие автоматические маркетмейкеры (АММ²) обеспечить не способны: самооптимизация, формальные гарантии, программная обнаруживаемость и межагентные переговоры.

Вклад данной работы осуществляется на трёх уровнях:

Строгие результаты. Мы вводим семейство обобщённых кривых связывания (Generalized Bonding Curve, GBC) — математически корректную параметризацию, интерполирующую между кривой постоянного произведения и концентрированной ликвидностью посредством единственного параметра кривизны $\kappa \in [0, 1]$. Мы доказываем эффективность вычисления обменных операций методом Ньютона–Рафсона со сходимостью $O(\log \log(1/\epsilon))$. Мы устанавливаем точную нижнюю границу потери общественного благосостояния $\Omega(T)$ для статических кривых в условиях рынка с переключением режимов.

Агентно-теоретическая структура. Опираясь на литературу по АЭА, мы моделируем, как автономные агенты обнаруживают пулы ликвидности через ончейн-реестры (АЕАМСР), оценивают сделки посредством вычисления предельной полезности и взаимодействуют по протоколу А2А. Мы анализируем принятие решений агентами в условиях неопределённости и характеризуем теоретико-игровое равновесие многоагентной торговли.

Направления исследований. Мы предлагаем Q-обучение (Q-learning) для ончейн-адаптации параметров, определяя компромисс между отслеживанием и обучением как центральное теоретическое препятствие в нестационарных средах. Мы намечаем механизм проектирования многоуровневого доступа с доказательствами совместимости стимулов при условии принятия цен.

Механизм выпуска через «виртуальные пулы». Мы вводим механизм выпуска токенов с нулевой рентой³, использующий кривые связывания с защитой от манипуляций. Токены существуют виртуально, пока не достигнут динамического порога выпуска, штрафующего стратегии «накачка и сброс» через обнаружение оттока. Мы доказываем, что игра выпуска обладает единственным совершенным в подыграх равновесием, при котором манипуляция невыгодна, обеспечивая до 1,49 миллиона держателей на пул при использовании всего 7 байт на держателя благодаря новой хеш-компрессии.

Мы прямо указываем на ограничения: гипотезы о сходимости ожидают строгого доказательства; интеграция реестра агентов находится на стадии проектирования; характеристика равновесия остаётся открытой задачей. Данная работа является одновременно техническим вкладом и исследовательской программой для адаптивных, агентно-нативных децентрализованных финансов.

Ключевые слова: Автоматические маркетмейкеры, Автономные экономические агенты, Обучение с подкреплением, Проектирование механизмов, Протокол А2А, Протокол х402, Кривые связывания, Многоагентные системы

Классификация JEL: D47, G14, C73

Классификация MSC: 91B26, 68T05, 91A25

¹АЭА — Автономный экономический агент (англ. Autonomous Economic Agent, АЕА) — программа, действующая от имени владельца для извлечения экономической выгоды.

²АММ — Automated Market Maker, автоматический маркетмейкер. Говоря простым языком: АММ — это как обменник валюты, только вместо тётеньки за стеклом работает компьютерная программа, и обмен происходит мгновенно.

³Говоря простым языком: «выпуск токенов с нулевой рентой» означает, что можно создать новую цифровую валюту, не платя за постоянное хранение данных в блокчейне. Это как открыть ларёк на рынке бесплатно — пока бизнес не вырастет достаточно, чтобы арендовать настоящий магазин.

Содержание

1	Введение	6
1.1	Тезис	6
1.2	Почему сейчас: агентная экономика	7
1.3	Автономные экономические агенты: концептуальная основа	7
1.4	Многоагентные системы и доверие	8
1.5	Ончейн-обнаружение агентов	9
1.6	Протоколы A2A и x402	9
1.7	Структура статьи и политика честности	10
1.8	Краткое изложение вклада	10
1.9	Обзор системной архитектуры	11
1.10	Сравнение с существующими АММ	11
2	Пределы статических АММ	11
2.1	Модель рынка	12
2.2	Благосостояние и оптимальность	13
2.3	Граница благосостояния для статических кривых	14
2.4	Интерпретация: разрыв адаптивности	15
2.5	Практические следствия	15
3	Обобщённые кривые связывания	15
3.1	Почему наивное смешивание не работает	16
3.2	Семейство обобщённых кривых связывания	16
3.3	Геометрическая интерпретация	17
3.4	Вычисление обмена	17
3.5	Анализ эффективности капитала	18
3.6	Ограничения семейства ОКС	19
4	Обучение с подкреплением для адаптации	19
4.1	Задача адаптации как MDP	20
4.2	Проблема нестационарности	20
4.3	Компромисс между отслеживанием и обучением	20
4.4	Предлагаемая архитектура Q-обучения	21
4.5	Ограниченные действия для безопасности	22
4.6	Открытые задачи в обучении	22
5	Проектирование механизмов для многоуровневого доступа	23
5.1	Структура уровней	23
5.2	Типы трейдеров и оценки	23
5.3	Анализ совместимости со стимулами	24
5.4	Ограничения анализа	24
6	Система Выпуска Виртуальных Пулов	25
6.1	Проблема Холодного Старта	25
6.2	Архитектура Виртуального Пула	25
6.3	Антиманипуляционная Защита: Динамическая Цель Выпуска	26
6.4	Жизненный Цикл Выпуска	27
6.5	Распределение Токенов и Вестинг	27

6.6	Ультракомпактное Представление Держателей	28
6.7	Фарминг После Выпуска: Маховик Объёмов	28
6.7.1	Проблема Pump.fun	29
6.7.2	Инновация Конкурентного Фарминга	29
6.7.3	Петля Положительной Обратной Связи	29
6.7.4	Динамика Конкуренции	30
6.7.5	Сравнение с Токеномикой Pump.fun	30
6.7.6	Случайность по Схеме Коммит-Раскрытие	31
6.7.7	90-Дневное Затухание Вознаграждений	31
6.8	Теоретико-Игровой Анализ	31
7	Интеграция с протоколом x402	32
7.1	Обзор протокола x402	33
7.2	Предлагаемая архитектура	33
7.3	Проектные вопросы	33
7.4	Ликвидность как услуга	34
7.5	Интеграция с реестрами агентов	34
8	Экономика агентов и теория принятия решений	35
8.1	Задача принятия решения агентом	35
8.2	Предпочтения и предельная полезность	35
8.3	Коммуникация и координация агентов	36
8.4	Поведенческие паттерны и типы агентов	36
8.5	Теоретико-игровые аспекты	37
9	Ограничения и открытые проблемы	37
9.1	Теоретические пробелы	37
9.2	Практические вызовы	38
9.3	Что может пойти не так	38
9.4	Сравнение с альтернативами	38
9.5	Будущая работа	39
10	Обзор литературы	39
11	Заключение	39
11.1	Исследовательская повестка	40
A	Детали вычисления свопов в рамках ОКС	41
A.1	Постановка задачи	41
A.2	Итерационное обновление по методу Ньютона–Рафсона	42
A.3	Инициализация	42
A.4	Критерий сходимости	42
A.5	Число итераций	42
B	Доказательство Теоремы 2.5	42
C	Детали кодирования состояний	43
C.1	Определения признаков	43
C.2	Выбор пороговых значений	43
C.3	Частота обновления	43

1 Введение

1.1 Тезис

Когда в 2018 году был запущен Uniswap, его создатели столкнулись с фундаментальным вопросом: какой обменный курс должен предлагать децентрализованный пул ликвидности? Их ответом стала формула постоянного произведения $xy = k^4$ — элегантная, простая и судьбоносная. Она замечательно работала для торговли общего назначения. Однако она также закрепила допущение: что все пары токенов должны торговаться по одной и той же кривой, независимо от того, являются ли они волатильными криптовалютами или стейблкоинами, которые должны держаться вблизи паритета.

Два года спустя Curve Finance предложил иной ответ для стейблкоинов⁵: более пологую кривую, оптимизированную для пар, которые, как ожидается, торгуются 1:1. Это было лучше для стейблкоинов, но хуже для активов, которые могут разойтись в цене. Затем появился Uniswap v3 с концентрированной ликвидностью, Balancer с взвешенными пулами и множество специализированных конструкций АММ. Каждая оптимизирует под различные допущения о поведении рынка.

В этом и заключается проблема: рынки меняются, а кривые — нет. Пул, запущенный в стабильных условиях, может столкнуться с событием дегега⁶. Пул, спроектированный для коррелированных активов, может обнаружить, что корреляция разрушилась. Кривая, оптимальная вчера, может оказаться неоптимальной завтра. И тем не менее, изменение фундаментальных параметров пула требует управленческих предложений, голосований сообщества и времени — роскоши, недоступной во время кризиса⁷.

Данная работа выдвигает простой тезис: автоматические маркетмейкеры должны учиться на опыте. Существующие АММ используют фиксированные обменные функции, выбранные при развёртывании: постоянное произведение для Uniswap, StableSwap для Curve, концентрированную ликвидность для Uniswap v3. Эти выборы закладывают допущения о поведении активов, которые могут не выполняться по мере эволюции рынков. Мы утверждаем, что АММ должны адаптировать свои обменные функции в ответ на наблюдаемые рыночные условия, и предоставляем теоретические основания для такой адаптации.

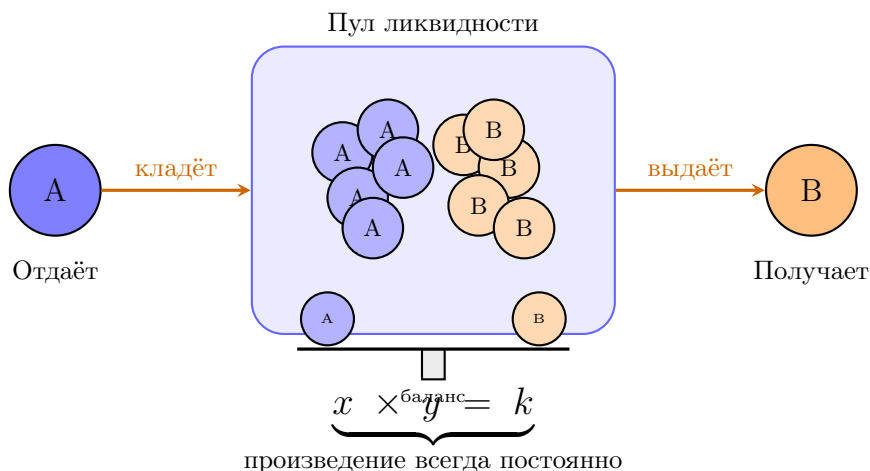


Рис. 1: Принцип работы автоматического маркетмейкера (АММ). Пользователь кладёт токены одного вида и получает токены другого вида. Баланс пула поддерживается математической формулой.

⁴Говоря простым языком: формула $xy = k$ означает следующее. Представьте, что в обменнике лежат две валюты, и их количества всегда перемножаются в одно и то же число. Если кто-то купил много долларов, их стало меньше, и цена автоматически выросла — как товар на рынке дорожает, когда его мало.

⁵Стейблкоины (stablecoins) — криптовалюты, привязанные к стоимости реальных валют, например к доллару США. Говоря простым языком: это как жетоны в метро — каждый жетон всегда стоит ровно столько, сколько стоит одна поездка.

⁶Дегег (depeg) — потеря привязки стейблкоина к базовому активу. Говоря простым языком: это когда жетон метро, который должен стоить 60 рублей, вдруг начинает стоить 45 — все паникуют, потому что обещали, что он всегда будет стоить 60.

⁷Говоря простым языком: это как если бы для того, чтобы поменять курс в обменнике, нужно было бы провести общее собрание жильцов дома, проголосовать, подождать неделю — а валюта за это время уже обвалилась.

⁸Говоря простым языком: Рисунок 1 показывает суть обменника. Представь бассейн с двумя видами шариков — синими

Наш тезис состоит не в том, что адаптация проста или что мы решили все проблемы. Скорее, мы ставим перед собой следующие задачи:

1. Формализовать, что означает «адаптивный АММ» в математическом смысле.
2. Доказать, что адаптация в принципе может превзойти любую статическую конструкцию.
3. Определить ключевые технические трудности достижения практической адаптации.
4. Предложить конкретные механизмы и проанализировать их свойства.
5. Открыто указать на то, что остаётся недоказанным или гипотетическим.

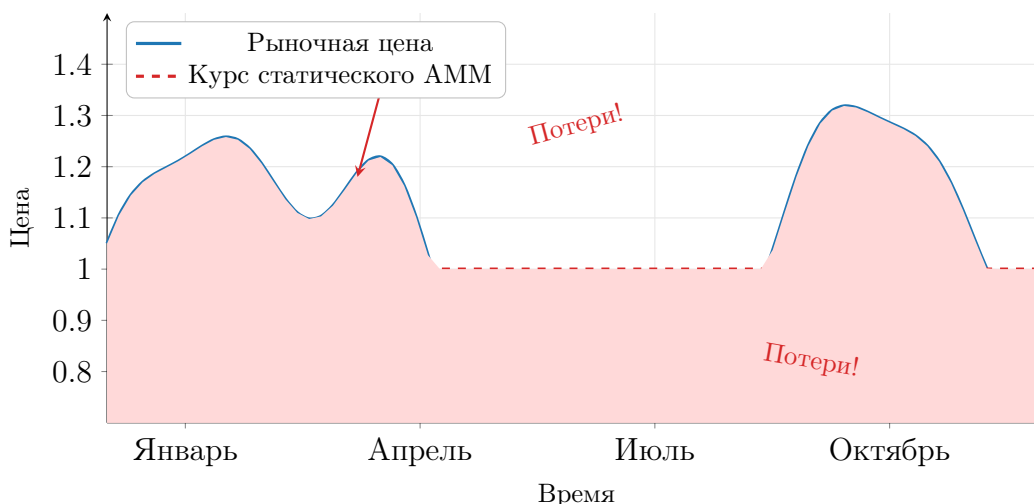


Рис. 2: Разрыв между рыночной ценой и фиксированным курсом АММ. Закрашенные области показывают накапливающиеся потери: чем дольше курс неподвижен, тем больше убытков.

9

1.2 Почему сейчас: агентная экономика

Наш интерес к адаптивным АММ мотивирован более широкой трансформацией: появлением автономных агентов как экономических субъектов. Представьте будущее — возможно, более близкое, чем кажется, — в котором миллионы ИИ-агентов работают непрерывно, принимая тысячи экономических решений ежедневно. Агент, отслеживающий доходность DeFi¹⁰, может перебалансировать портфель ежечасно. Агент генерации контента может оплачивать вычислительные ресурсы каждые несколько секунд. Торговый агент может искать наилучший обменный курс среди десятков площадок за миллисекунды¹¹.

Эти агенты не спят. Они не берут выходных. Они не ждут, пока пройдут управленческие голосования. Они действуют со скоростью машины и нуждаются в инфраструктуре, работающей со скоростью машины.

1.3 Автономные экономические агенты: концептуальная основа

Чтобы понять, для чего должны быть предназначены адаптивные АММ, необходимо понять, чем являются автономные экономические агенты. Данное понятие было формализовано в литературе

и оранжевыми. Ты бросаешь синие шарики, а бассейн выдаёт тебе оранжевые. Чем больше синих бросишь — тем меньше оранжевых останется, и тем дороже каждый следующий оранжевый. Формула $xy = k$ — это просто правило: произведение количества шариков двух цветов всегда одинаково, как на весах.

⁹Говоря простым языком: На рисунке 2 синяя линия — это настоящая цена на рынке, она постоянно скачет вверх-вниз. Красная пунктирная линия — это курс нашего «упрямого» обменника, который не меняется. Розовые области между ними — это деньги, которые обменник теряет. Когда рыночная цена выше — обменник продаёт слишком дешево. Когда ниже — никто не хочет у него покупать. Умный обменник должен следить за синей линией и подстраиваться.

¹⁰DeFi — Decentralized Finance, децентрализованные финансы — финансовые сервисы, работающие на блокчейне без банков и посредников.

¹¹Говоря простым языком: представь, что вместо тебя на бирже торгуют тысячи роботов-помощников. Они не спят, не устают, работают со скоростью света — и им нужен обменник, который работает так же быстро.

по многоагентным системам [Minarsch et al., 2020], где Автономный экономический агент (АЭА) определяется следующим образом:

Интеллектуальный агент, действующий от имени своего владельца с ограниченным вмешательством последнего или без такового, целью которого является генерация экономической ценности для владельца.

Это определение точно указывает, чем АЭА являются — и чем они не являются. Они не являются универсальными помощниками, обслуживающими любые потребности владельца. Они не являются цифровыми двойниками, отражающими личность. Они не являются пассивными API-интерфейсами или смарт-контрактами (которые лишены автономной агентности). И уж точно они не являются системами ОИИ¹². Скорее, АЭА — это экономические акторы узкой специализации: программное обеспечение, стремящееся к генерации богатства в рамках чётко определённых параметров¹³.

Что делает АЭА отличительными как агентов? Три свойства:

- Автономность: они действуют независимо от постоянного контроля владельца, принимая решения в соответствии с предписанными целями.
- Проактивность: они проявляют инициативу, а не просто реагируют на стимулы, активно выискивая возможности.
- Корыстность: они ставят интересы владельца выше общего благополучия системы — это особенность, а не дефект, позволяющая проектировать системы с согласованными стимулами.

Концептуальная основа АЭА [Minarsch et al., 2020] операционализирует эти свойства через модульную архитектуру. АЭА состоит из Навыков (Skills — бизнес-логика), Соединений (Connections — интерфейсы к сетям и API), Протоколов (Protocols — форматы сообщений и правила диалога) и Контрактов (Contracts — обёртки смарт-контрактов). «Экономический мозг» агента — называемый DecisionMaker (Модуль принятия решений) — поддерживает кошелёк, оценивает транзакции в соответствии с предпочтениями владельца и вычисляет показатели предельной полезности для принятия решений о том, какие сделки принять.

Эта архитектура имеет прямые следствия для проектирования АММ. Когда АЭА обращается к пулу ликвидности, он не «нажимает кнопку обмена», как это делает человек. Он:

1. Запрашивает текущее состояние пула через Соединение (Connection).
2. Оценивает предлагаемую сделку в соответствии со своими Предпочтениями (Preferences) — ожидаемая полезность в сравнении с затратами.
3. Если сделка выгодна, формирует транзакцию с использованием соответствующего Протокола.
4. Отправляет транзакцию через блокчейн-Соединение и фиксирует результат.

Каждый из этих шагов происходит программно, за миллисекунды. Умножьте это на миллионы агентов, принимающих тысячи решений ежедневно, — и станет понятно, почему инфраструктура АММ столь важна: она является субстратом, на котором функционирует целая экономика¹⁴.

1.4 Многоагентные системы и доверие

АЭА не действуют изолированно. Они взаимодействуют с другими агентами в рамках того, что специалисты по информатике называют многоагентной системой (МАС, англ. Multi-Agent System, MAS) — децентрализованной системой, в которой автономные агенты координируются для достижения целей. МАС по своей природе сложны: каждый агент преследует собственные цели, возникают конфликты интересов, агенты действуют асинхронно, и без центральной координации неопределённость пронизывает всё.

¹²ОИИ — общий искусственный интеллект (англ. AGI, Artificial General Intelligence).

¹³Говоря простым языком: АЭА — это не «умный робот из фильма», а специализированная программа-торговец. Как биржевой маклер, который знает только одно — покупать и продавать с выгодой для клиента. Он не будет с тобой чай пить и про жизнь разговаривать.

¹⁴Говоря простым языком: все эти программы-агенты — как тысячи покупателей в огромном магазине. А АММ — это кассовый аппарат. Если кассовый аппарат медленный или ломается — весь магазин встаёт. Поэтому нужен очень надёжный и быстрый «кассовый аппарат».

Как создать надёжную инфраструктуру в подобных условиях? Ответ из теории распределённых систем — Византийская отказоустойчивость (Byzantine Fault Tolerance, BFT) [Lamport et al., 1982]¹⁵. Вместо того чтобы доверять какому-либо одному агенту, мы проектируем протоколы, в которых корректность гарантируется при условии, что менее одной трети участников неисправны или злонамерены. Конкретно, при $N = 3f + 1$ агентах мы можем допустить до f отказов, сохраняя при этом консенсус.

Это создаёт так называемую систему с минимизированным доверием: доверие не устраняется (некоторые допущения всегда необходимы), но распределяется между множеством независимых сторон. Ни один агент — или малая коалиция — не может разрушить систему.

Как это связано с АММ? Существующие АММ уже минимизируют доверие в одном смысле: смарт-контракт обеспечивает соблюдение обменного инварианта независимо от того, кто отправляет транзакции. Однако они не являются адаптивными — инвариант фиксируется при развёртывании. Наше предложение расширяет минимизацию доверия на уровень адаптации: механизм Q-обучения, корректирующий параметры кривой, сам по себе должен быть устойчив к манипуляциям со стороны любого малого подмножества трейдеров.

1.5 Ончейн-обнаружение агентов

Прежде чем агенты смогут торговать, они должны найти друг друга. В традиционных системах это означает централизованные каталоги — единые точки отказа и цензуры. Децентрализованная альтернатива — ончейн-реестры агентов¹⁶.

Проект АЕАМСР [OpenSVM, 2025] демонстрирует этот паттерн на Solana. Он предоставляет два взаимосвязанных реестра: Реестр агентов (Agent Registry) для автономных агентов, следующих парадигмам АЕА и А2А, и Реестр МСР-серверов (MCP Server Registry) для серверов Model Context Protocol, предоставляющих инструменты и ресурсы.

Архитектура использует гибридную модель хранения. Существенные данные — идентификаторы, владение, статус, точки обслуживания — хранятся ончейн в адресах, производных от программы (Program Derived Addresses, PDA¹⁷). Расширенные метаданные — полные схемы возможностей, документация — хранятся вне блокчейна, а криптографические хеши размещаются ончейн для проверки целостности. Это балансирует стоимость (арендная плата Solana высока для больших объёмов данных) и верифицируемость (хеши доказывают, что внешние данные не были подменены).

Каждая запись реестра включает авторитет владельца (контролирующий модификации), точки обслуживания (где можно связаться с агентом), флаги возможностей и URI расширенных метаданных, ведущий к полным спецификациям. Обнаружение происходит через событийно-управляемое офчейн-индексирование: реестр эмитирует события при всех изменениях состояния, которые индексообразы обрабатывают в запрашиваемые базы данных.

Как это связано с АЕХ-402? Наши адаптивные пулы АММ могут сами быть зарегистрированы как агенты — обнаруживаемые любым АЭА, ищущим услуги ликвидности. Точкой обслуживания пула будет HTTP API с поддержкой x402. Его возможности будут включать «swap» (обмен), «add_liquidity» (добавление ликвидности), «oracle_query» (запрос к оракулу). Другие агенты смогут обнаружить его, запросить текущее значение κ и решить, стоит ли торговать¹⁸.

1.6 Протоколы А2А и x402

Два протокола формируют коммуникационную основу для агентной коммерции.

Протокол А2А (Agent-to-Agent, «агент к агенту») [Linux Foundation, 2025], изначально разработанный компанией Google и переданный фонду Linux Foundation, обеспечивает стандарт межагентной коммуникации. Он позволяет агентам взаимодействовать, не раскрывая внутреннюю память, инструменты или проприетарную логику — сохраняя безопасность при обеспечении сотрудничества. А2А

¹⁵Говоря простым языком: «Византийская отказоустойчивость» — название из старой задачи про генералов, осаждающих крепость. Часть генералов — предатели, но армия всё равно должна действовать согласованно. Так и здесь: даже если часть участников жулики, система в целом работает честно.

¹⁶Ончейн (on-chain) — «в цепи», то есть непосредственно в блокчейне. Говоря простым языком: это как телефонная книга, записанная не в тетрадку (которую можно потерять или подделать), а вырезанная в камне — её все видят, и никто не может незаметно исправить.

¹⁷PDA — Program Derived Addresses — адреса, математически вычисляемые из программы. Говоря простым языком: это как автоматически генерируемый номер квартиры в доме — его невозможно подделать, потому что он вычисляется из адреса дома и этажа.

¹⁸Говоря простым языком: каждый пул ликвидности становится как магазин с вывеской на центральной улице. Любой «робот-покупатель» может прочесть вывеску, зайти, узнать цены — и решить, покупать здесь или пойти дальше.

дополняет MCP (Model Context Protocol — протокол контекста модели): MCP стандартизирует коммуникацию «агент–инструмент»; A2A стандартизирует коммуникацию «агент–агент». Вместе они образуют полный стек совместимости.

Протокол x402 [x402 Foundation, 2025], запущенный компанией Coinbase и партнёрами в 2025 году, активирует HTTP-код статуса 402 («Payment Required» — «Требуется оплата») для нативных интернет-платежей. Это позволяет программным агентам оплачивать ресурсы — вычисления, данные, услуги — непосредственно через HTTP, без учётных записей и вмешательства человека. Это «водопровод», делающий межагентную коммерцию возможной¹⁹.

Когда агенты могут платить, им также потребуется обменивать валюты. Агент, получающий доход в USDC, может нуждаться в оплате услуг в SOL. Арбитражный агент может нуждаться в обмене через несколько площадок. Агент управления портфелем может нуждаться в перебалансировке позиций. Эти агенты будут предъявлять к обменной инфраструктуре требования, соответствующие их характеристикам:

- Программный доступ: HTTP API вместо подключений кошельков.
- Предсказуемое исполнение: ограниченное проскальзывание и формальные гарантии.
- Самооптимизация: отсутствие зависимости от управления человеком.
- Многоуровневое обслуживание: возможность оплаты приоритетного исполнения.

Существующие АММ были спроектированы для людей, нажимающих кнопки в интерфейсах кошельков. Адаптивные АММ могут быть спроектированы для агентов, совершающих API-вызовы с миллисекундным интервалом. Разница существенна: агенты могут обрабатывать информацию быстрее, но при этом обладают меньшей толерантностью к непредсказуемости. Агент, ожидающий проскальзывание 0,05%, но получивший 0,5%, потратил в 10 раз больше ожидаемых затрат — и, в отличие от человека, он не может пожать плечами и попробовать снова позже.

1.7 Структура статьи и политика честности

Настоящая работа содержит как строгие результаты, так и гипотетические предложения. Мы поддерживаем строгое разделение:

Доказанные результаты обозначены как Теоремы, Утверждения или Леммы с полными доказательствами или ссылками на литературу.

Направления исследований обозначены как Гипотезы или Открытые задачи. Они представляют наши текущие наилучшие представления, но требуют дальнейшей работы.

Проектные предложения (в особенности касающиеся интеграции с x402) описывают системы, которые, по нашему мнению, следует создать, а не системы, существующие в настоящее время.

Мы убеждены, что такая политика честности служит читателю лучше, чем распространённая практика представления гипотез как теорем или проектов как реализаций²⁰.

1.8 Краткое изложение вклада

Раздел 2: Мы доказываем, что статические АММ страдают фундаментальными ограничениями. В условиях рынка с переключением режимов любая фиксированная кривая накапливает потерю общественного благосостояния $\Omega(T)$ на временном горизонте T . Эта граница является точной: мы конструируем рынки, на которых любой статический выбор оказывается неоптимальным по меньшей мере половину времени.

Раздел 3: Мы вводим семейство обобщённых кривых связывания (GVC) — математически корректную параметризацию, интерполирующую между различными типами кривых. В отличие от наивного смешивания (которое является некорректно определённым), GVC использует единственный параметр кривизны κ для управления компромиссом между эффективностью капитала и робастностью. Мы доказываем эффективность вычисления обменных операций.

¹⁹Говоря простым языком: протокол x402 — это как автомат с газировкой. Бросил монетку — получил бутылку. Не нужно общаться с продавцом, предъявлять паспорт, заводить аккаунт. Программа просто платит — и получает услугу.

²⁰Говоря простым языком: мы честно говорим, что доказано, а что — пока лишь наши догадки. Это как в медицине: одно дело — «доказано клиническими испытаниями», другое — «доктор думает, что это поможет». И то и другое полезно, но надо различать.

Раздел 4: Мы формулируем адаптивный выбор кривой как задачу обучения с подкреплением. Мы определяем компромисс между отслеживанием и обучением как центральную проблему: обучение требует стабильности (для сходимости), тогда как адаптация требует отзывчивости (для отслеживания изменяющихся оптимумов). Мы формулируем гипотезы о сходимости и определяем, что необходимо для их доказательства.

Раздел 5: Мы анализируем проектирование механизмов для многоуровневого доступа. Агенты могут оплачивать гарантии исполнения через x402. Мы доказываем совместимость стимулов при допущении принятия цен и определяем открытые задачи для стратегических условий.

Раздел 7: Мы описываем предлагаемую архитектуру интеграции с x402. Данный раздел явным образом является проектным предложением, а не отчётом о реализации.

Раздел 8: Мы анализируем, как автономные экономические агенты принимают торговые решения, опираясь на концептуальную основу АЭА [Minarsch et al., 2020]. Мы моделируем полезность агентов, предпочтения, протоколы коммуникации и теоретико-игровые взаимодействия.

Раздел 9: Мы откровенно обсуждаем ограничения, открытые проблемы и возможные неудачи.

1.9 Обзор системной архитектуры

На Рисунке 3 представлена полная архитектура АЕХ-402, интегрирующая ончейн- и офчейн-компоненты с агентной экосистемой.

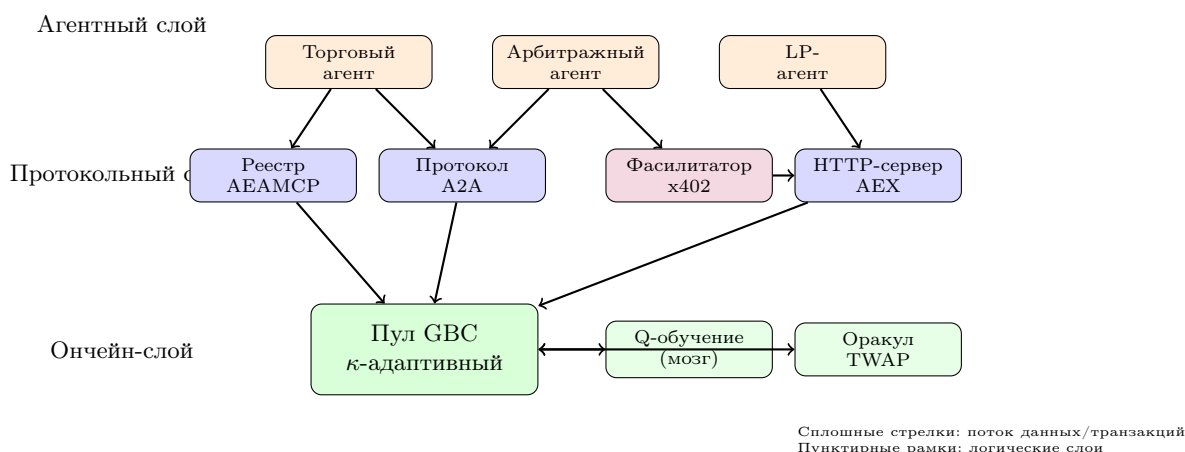


Рис. 3: Полная системная архитектура АЕХ-402. Агенты обнаруживают пулы через АЕАМСР, взаимодействуют по протоколу А2А, оплачивают услуги через x402 и работают с адаптивными пулами GBC, которые обучаются на торговых паттернах²¹.

1.10 Сравнение с существующими АММ

Таблица 1 сравнивает АЕХ-402 с существующими конструкциями АММ по ключевым параметрам.

Ключевым отличием является сочетание адаптивного выбора кривой с агентно-нативной инфраструктурой. Curve v2 адаптируется, но использует эвристики, а не обучение, и ни один из существующих АММ не интегрируется с протоколами обнаружения и коммуникации агентов²².

2 Пределы статических АММ

Прежде чем предлагать адаптивные механизмы, необходимо установить, что адаптация действительно необходима. В настоящем разделе доказываем, что статические АММ (автоматические маркет-мейкеры) — то есть системы с фиксированными функциями обмена — обладают фундаментальными ограничениями в условиях изменяющихся рынков.

²³

²²Говоря простым языком: в этой таблице мы сравниваем наш «обменник» с конкурентами. Все остальные работают по одним и тем же правилам, которые были заданы при создании. Наш — единственный, который «учится» и «разговаривает»

Таблица 1: Сравнение конструкций АММ. АЕХ-402 — единственная конструкция, сочетающая адаптивные кривые с агентно-нативными протоколами.

Характеристика	Uniswap v2	Curve v1	Uniswap v3	Curve v2	АЕХ-402
Тип кривой	Пост. произв.	StableSwap	Концентр.	Динам. привязка	Семейство GBC
Адаптация	Нет	Нет	Ручная (LP)	Эвристика	Q-обучение
Параметры	Фиксированы	Фикс. A	Позиции LP	Авторебаланс	κ обучается
Обнаруж. агентов	Нет	Нет	Нет	Нет	АЕАМСП
Протокол агентов	Нет	Нет	Нет	Нет	A2A
НТТР-нативность	Нет	Нет	Нет	Нет	x402
Многоур. доступ	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
Ончейн-оракул	Нет	Огранич.	Нет	ЕМА	TWAP
Эффект. капитала	Низкая	Выс. (привяз.)	Выс. (диап.)	Средняя	Адаптивная
Робастность	Высокая	Низк. (депег)	Средняя	Средняя	Адаптивная
Выч. стоимость	~1K CU	~3K CU	~2K CU	~5K CU	~3K CU

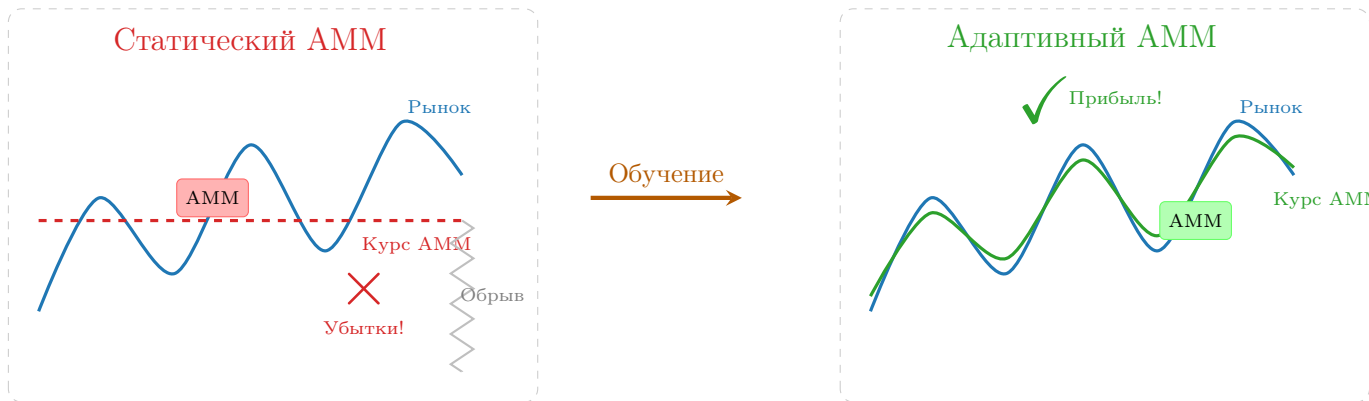


Рис. 4: Сравнение статического и адаптивного АММ. Слева: фиксированный курс игнорирует изменения рынка и «падает с обрыва». Справа: адаптивный курс следует за рынком, сохраняя прибыльность.

24

Аргумент интуитивно прост: если рынок чередует два различных состояния и каждому состоянию соответствует своя оптимальная кривая обмена, то любая единственная фиксированная кривая будет ошибочной как минимум половину времени. Мы формализуем эту интуицию в теорему, показывающую, что статические кривые накапливают потери благосостояния линейно с течением времени.

2.1 Модель рынка

Для строгого анализа адаптации нам нужна модель того, как меняются рынки. Простейшая полезная модель — та, в которой рынки чередуют различные «режимы» — периоды с различными статистическими свойствами.

Рассмотрим пару стейблкоинов (стабильных монет, привязанных к доллару), например USDC/USDT. Большую часть времени оба торгуются вблизи \$1,00, с небольшими колебаниями. Это «спокойный» режим: низкая волатильность (то есть малый разброс цен), высокая корреляция (то есть монеты движутся согласованно). Время от времени стрессовые события вызывают отклонение одного стейблкоина от привязки — возможно, на короткое время во время банковской паники, или на более длительный срок при отказе протокола. Это «штормовой» режим: высокая волатильность, нарушенная корреляция.

25

с роботами-покупателями на их языке.

²³Говоря простым языком: Статический АММ — это как обменный курс, который установили раз и навсегда. Представь, что в обменнике доллар стоит 90 рублей и никогда не меняется — даже если в мире кризис или, наоборот, полная благодать. Понятно, что такой обменник будет работать плохо: иногда курс завьшен, иногда занижен.

²⁴Говоря простым языком: Рисунок 4 показывает аналогию с горной дорогой. Представь, что ты едешь по серпантину. Статический АММ (слева) — это водитель, который едет строго по прямой: рано или поздно он свалится с обрыва. Адаптивный АММ (справа) — это водитель, который следит за поворотами и подстраивает руль. Наша задача — научить обменник «крутить руль» автоматически.

²⁵Говоря простым языком: Режим рынка — это как погода: бывает спокойная и штормовая. И обменнику нужно

Оптимальная кривая АММ кардинально различается между этими режимами. В спокойное время провайдеры ликвидности (то есть те, кто вносит деньги в «общий котёл» для обмена) хотят плоскую кривую (как StableSwap), концентрирующую капитал вблизи привязки и приносящую комиссии без значительных непостоянных потерь. В штормовые времена им нужна устойчивая кривая (как постоянное произведение, constant product), которая не даёт катастрофически неверных цен при разрыве привязки.

Мы моделируем рыночные условия как экзогенный (то есть внешний, не зависящий от поведения самого АММ) стохастический процесс. Это упрощение: в действительности поведение АММ влияет на рыночные условия. Мы обсуждаем это ограничение в разделе 9.

Определение 2.1 (Рыночный режим). Рыночный режим $\sigma \in \Sigma$ определяется следующими характеристиками:

- Волатильность $v(\sigma)$: ожидаемая величина ценовых изменений
- Корреляция $\rho(\sigma)$: степень согласованности движения активов в пуле
- Объём $V(\sigma)$: ожидаемая торговая активность

Определение 2.2 (Процесс переключения режимов). Рынок с переключением режимов чередует режимы σ_H (высокая волатильность, низкая корреляция) и σ_L (низкая волатильность, высокая корреляция) согласно марковской цепи (то есть случайному процессу, где следующее состояние зависит только от текущего) с матрицей переходов:

$$P = \begin{pmatrix} 1-p & p \\ q & 1-q \end{pmatrix} \tag{1}$$

где $p, q \in (0, 1)$ — вероятности переключения.

Данная модель отражает ключевое явление: рынки чередуют «спокойные» периоды (когда стейблкоины поддерживают привязку, коррелированные активы движутся согласованно) и «штормовые» периоды (когда корреляции разрушаются и цены движутся резко). Вероятности переключения p и q управляют частотой смены режимов — малые значения означают длительные периоды стабильности, большие значения — быстрое чередование.

2.2 Благополучие и оптимальность

Как определить, какая кривая «лучше»? Нам нужна метрика, учитывающая интересы всех участников. Трейдеры (торговцы) хотят низкое проскальзывание (то есть минимальное отклонение реальной цены от ожидаемой). Провайдеры ликвидности хотят высокие комиссии и низкие непостоянные потери. Иногда эти интересы конфликтуют — плоская кривая даёт трейдерам низкое проскальзывание, но подвергает провайдеров ликвидности непостоянным потерям в период волатильности.

Мы разрешаем это противоречие путём измерения общественного благосостояния (social welfare): суммы полезностей всех участников. Это стандартный подход в теории механизмов, хотя мы признаём, что он не учитывает вопросы распределения. Пул, отличный для трейдеров, но ужасный для провайдеров ликвидности, может иметь высокое общественное благосостояние, но не привлечёт ликвидность.

26

Разные кривые по-разному работают при разных режимах. Мы измеряем эффективность через общественное благосостояние: сумму доходов провайдеров ликвидности и выигрыша трейдеров.

Определение 2.3 (Общественное благосостояние). Для кривой c при режиме σ мгновенное общественное благосостояние составляет:

$$W(c, \sigma) = \underbrace{f \cdot V(\sigma) - \Pi(c, \sigma)}_{\text{полезность провайдеров ликвидности}} + \underbrace{V(\sigma) \cdot (1 - s(c, \sigma))}_{\text{выигрыш трейдеров}} \tag{2}$$

где f — ставка комиссии, Π — непостоянные потери (impermanent loss), а s — среднее проскальзывание (slippage).

работать по-разному в каждую погоду. В солнечный день можно поставить столик на улице и торговать спокойно. А в ураган нужно закрыть ставни и поднять цены, чтобы не разориться. Статический обменник не умеет реагировать на погоду вообще.

²⁶Говоря простым языком: Представь базар. Благополучие — это когда и продавцам хорошо (они зарабатывают), и покупателям хорошо (цены справедливые). Мы считаем общую «счастливость» всего базара. Если продавцы богатеют, а покупатели разоряются — это не считается хорошим результатом.

Определение 2.4 (Оптимальная кривая для режима). Оптимальная кривая для режима σ определяется как:

$$c^*(\sigma) = \arg \max_c W(c, \sigma) \quad (3)$$

Ключевое наблюдение состоит в том, что $c^*(\sigma_H) \neq c^*(\sigma_L)$ в общем случае. Режимы высокой волатильности благоприятствуют устойчивым кривым (типа постоянного произведения), способным выдерживать значительные ценовые движения. Режимы низкой волатильности благоприятствуют концентрированным кривым (типа StableSwap), обеспечивающим эффективность капитала вблизи текущей цены.

Это не только теоретическое рассуждение. Вспомним коллапс привязки UST в мае 2022 года: пулы стейблкоинов, оптимизированные для условий привязки, понесли колоссальные непостоянные потери при обрушении UST. Пул, который переключился бы на более устойчивую кривую до потери привязки, защитил бы своих провайдеров ликвидности. Разумеется, предсказание таких событий сложно — но именно поэтому мы хотим пулы, способные адаптироваться в реальном времени, а не ожидать решений управления.

2.3 Граница благосостояния для статических кривых

Теперь докажем основной результат данного раздела: любая статическая кривая накапливает потери благосостояния линейно с течением времени. Доказательство прямолинейно после введения необходимых определений, однако его последствия глубоки. Оно означает, что разрыв между статической и оптимальной производительностью не сокращается со временем — он растёт. Статические кривые не «догоняют» адаптивные; они отстают всё больше.

Теорема 2.5 (Нижняя граница для статической кривой). Рассмотрим рынок с переключением режимов при $p, q > 0$ (невырожденное переключение). Пусть $\pi_H = q/(p + q)$ и $\pi_L = p/(p + q)$ — стационарные вероятности. Для любой статической кривой c :

$$\mathbb{E} \left[\int_0^T W(c^*(\sigma_t), \sigma_t) - W(c, \sigma_t) dt \right] \geq \delta \cdot T \quad (4)$$

где $\delta = \min\{\pi_H, \pi_L\} \cdot \min\{W(c^*(\sigma_H), \sigma_H) - W(c, \sigma_H), W(c^*(\sigma_L), \sigma_L) - W(c, \sigma_L)\} > 0$.

Доказательство. По свойству стационарности процесс проводит долю π_H времени в режиме σ_H и π_L — в режиме σ_L (в среднем, на длинных горизонтах).

Для любой фиксированной кривой c выполняется либо $c \neq c^*(\sigma_H)$, либо $c \neq c^*(\sigma_L)$ (либо оба неравенства), поскольку $c^*(\sigma_H) \neq c^*(\sigma_L)$ по предположению.

Случай 1: $c \neq c^*(\sigma_H)$. По определению оптимальности:

$$W(c^*(\sigma_H), \sigma_H) - W(c, \sigma_H) = \epsilon_H > 0 \quad (5)$$

Ожидаемое время пребывания в режиме σ_H на горизонте T составляет $\pi_H \cdot T + o(T)$ по эргодической теореме. Следовательно:

$$\mathbb{E} \left[\int_0^T \mathbf{1}[\sigma_t = \sigma_H] \cdot \epsilon_H dt \right] = \pi_H \cdot \epsilon_H \cdot T + o(T) \quad (6)$$

Случай 2: $c \neq c^*(\sigma_L)$. Аналогичное рассуждение даёт $\pi_L \cdot \epsilon_L \cdot T + o(T)$.

Полагая $\delta = \min\{\pi_H \epsilon_H, \pi_L \epsilon_L\}$, завершаем доказательство. □

27

Замечание 2.6. Данная граница является точной (tight). Рассмотрим $p = q = 1/2$, так что $\pi_H = \pi_L = 1/2$. Любая статическая кривая субоптимальна ровно половину времени, теряя $\epsilon T/2$ в математическом ожидании.

²⁷Говоря простым языком: Теорема говорит вот что. Представь, что ты выбрал один курс обмена навсегда. Но рынок бывает то спокойным, то бурным. В спокойные дни твой курс завышен, в бурные — занижен (или наоборот). С каждым днём ты теряешь деньги, и эти потери копятся. За год — потеряешь в десять раз больше, чем за месяц. Единственный выход — менять курс вместе с рынком.

2.4 Интерпретация: разрыв адаптивности

Теорема 2.5 заслуживает осмысления. Она утверждает нечто весьма сильное: какую бы статическую кривую вы ни выбрали, вы будете накапливать потери благосостояния пропорционально времени. Граница не о плохом выборе кривой — она о невозможности того, чтобы любой статический выбор был оптимальным.

Доказательство раскрывает причину: оптимальная кривая различается между режимами, а статическая кривая может соответствовать лишь одному режиму одновременно. В другом режиме она субоптимальна. Поскольку оба режима наступают с положительной вероятностью (по предположению), субоптимальность неизбежна.

Мы называем эти накопленные потери разрывом адаптивности (adaptivity gap) — разницей между тем, чего мы достигаем, и тем, чего могли бы достичь при идеальной адаптации.

Определение 2.7 (Разрыв адаптивности). Разрыв адаптивности кривой c на горизонте T определяется как:

$$\mathcal{G}(c, T) = \int_0^T W(c^*(\sigma_t), \sigma_t) - W(c, \sigma_t) dt \quad (7)$$

Теорема показывает, что $\mathbb{E}[\mathcal{G}(c, T)] = \Omega(T)$ для любой статической кривой c . Это мотивирует поиск адаптивных механизмов с разрывом $o(T)$ — или, в идеальном случае, $O(\sqrt{T})$, как достигается оптимальными алгоритмами обучения в стационарных условиях.

2.5 Практические следствия

Что означают линейные потери благосостояния на практике? Рассмотрим пул объёмом \$10 миллионов на протяжении одного года:

- Предположим, оптимальная комиссия составляет 0,30% на спокойном рынке и 0,50% на волатильном рынке
- Статическая комиссия в 0,40% теряет 0,10% от объёма в обоих режимах (по сравнению с оптимальной)
- При годовом объёме торгов \$100 миллионов это составляет \$100 000 недополученных комиссий
- Плюс разница в непостоянных потерях, затратах на проскальзывание и т. д.

Эти числа иллюстративны, а не эмпирические. Суть в том, что разрыв адаптивности транслируется в реальные экономические издержки. Оправдывают ли эти издержки сложность адаптации — эмпирический вопрос, на который мы пока не можем ответить.

28

3 Обобщённые кривые связывания

Установив, что адаптация ценна, мы теперь конструируем семейство кривых, пригодное для адаптивного выбора. Ключевое требование — непрерывная параметризация: нам нужны кривые, индексированные параметром κ , такие что малые изменения κ порождают малые изменения в поведении кривой.

29

30

Почему важна непрерывность? Потому что адаптация подразумевает постепенную настройку. Мы не хотим скачкообразно переходить от одного типа кривой к другому — это вызовет непредсказуемые

²⁸Говоря простым языком: За год такой «упрямый» обменник с фиксированным курсом теряет сто тысяч долларов. Это как если бы ты держал ларёк и упорно продавал арбузы по одной цене и зимой, и летом. Летом — дешево, покупатели довольны, но ты не зарабатываешь. Зимой — дорого, никто не берёт. А умный продавец подстраивает цену по сезону.

²⁹Говоря простым языком: Кривая обмена — это как правило, по которому обменник считает курс. Мы придумали такое правило, которое можно плавно настраивать — как ручку громкости на радио. Крутишь влево — курс жёсткий, но устойчивый к кризисам. Крутишь вправо — курс мягкий и выгодный для клиентов, но хрупкий при панике.

³⁰Говоря простым языком: Рисунок 5 — это как ручка громкости на радио, только вместо громкости она регулирует «жёсткость» обменного курса. Красная кривая ($\kappa = 0$) — это как крутой серпантин: надёжно, но неудобно. Зелёная прямая ($\kappa = 1$) — как гладкий мост: быстро и удобно, но при малейшем ветре можно упасть. Наш обменник умеет плавно крутить эту ручку, подстраиваясь под «погоду» на рынке.

ценовые изменения и создаст арбитражные (то есть спекулятивные) возможности. Мы хотим плавно интерполировать, возможно, начиная с устойчивой кривой постоянного произведения и постепенно выравнивая её по мере наблюдения стабильных условий, будучи готовыми вернуть кривизну при возврате волатильности.

Существующие конструкции АММ не предоставляют такой возможности. Постоянное произведение Uniswap и StableSwap от Curve — это отдельные математические объекты без естественной интерполяции между ними. Переход от одного к другому требует миграции ликвидности в другой пул. Нам нужно единое семейство, содержащее оба как частные случаи.

3.1 Почему наивное смешивание не работает

Прежде чем представить наше решение, разберёмся, почему очевидный подход не годится. Наивная идея — «смешать» существующие инварианты (то есть математические правила обмена), взяв их средневзвешенное:

$$\mathcal{I}_{\text{naive}}(x, y) = (1 - \kappa) \cdot xy + \kappa \cdot f_{\text{stable}}(x, y) \tag{8}$$

Выглядит естественно: при $\kappa = 0$ получаем постоянное произведение; при $\kappa = 1$ получаем StableSwap. Что может пойти не так?

Этот подход математически некорректен:

1. Несоответствие масштабов: Инвариант постоянного произведения $xy = k$ и инвариант StableSwap $f(x, y) = D$ порождают значения совершенно разных порядков. Складывать их бессмысленно.
2. Искажение линий уровня: Даже при нормализации линии уровня суммы функций не имеют простого соотношения с линиями уровня компонентов. «Смешанная» кривая может обладать патологическими свойствами.
3. Немонотонность: Нет гарантии, что увеличение κ плавно перестраивает поведение от постоянного произведения к StableSwap.

Нам нужен другой подход — математически корректный с самого начала.

31

3.2 Семейство обобщённых кривых связывания

Наше решение концептуально элегантно: вместо смешивания инвариантов (что математически некорректно) мы смешиваем показатели степени, управляющие кривизной.

Представим это геометрически. Кривая постоянного произведения $xy = k$ — это гипербола: сильно искривлённая, приближающаяся к осям, но никогда их не касающаяся. Кривая постоянной суммы $x + y = k$ — это прямая линия: нулевая кривизна, касающаяся обеих осей. Между этими крайностями лежит континуум кривых с промежуточной кривизной.

Мы можем двигаться по этому континууму, используя произведения с переменными показателями. Ключевое наблюдение: $(xy)^{1-\kappa} \cdot (x + y)^{2\kappa}$ плавно интерполирует между xy (при $\kappa = 0$) и $(x + y)^2$ (при $\kappa = 1$). Показатели всегда в сумме дают 2, обеспечивая согласованный масштаб.

Вместо смешивания инвариантов мы конструируем семейство, в котором кривизна линии уровня непрерывно меняется с параметром.

Определение 3.1 (Обобщённая кривая связывания (ОКС)). Для резервов (x, y) при $x, y > 0$, параметра кривизны $\kappa \in [0, 1]$ и параметра масштаба $D > 0$ определим:

$$\mathcal{I}_{\kappa}(x, y) = \left(\frac{xy}{D^2}\right)^{1-\kappa} \cdot \left(\frac{x + y}{2D}\right)^{2\kappa} = 1 \tag{9}$$

Данное определение обладает корректным предельным поведением:

Утверждение 3.2 (Граничные случаи). 1. При $\kappa = 0$: $\mathcal{I}_0(x, y) = xy/D^2 = 1$, что есть постоянное произведение с $k = D^2$.

³¹Говоря простым языком: Нельзя просто взять и смешать два рецепта борща — один на свёкле, другой на капусте — в произвольной пропорции. Получится не «борщ между ними», а несъедобная каша. Нужен один рецепт, в котором плавно регулируется «сколько свёклы, сколько капусты», и на каждом этапе блюдо остаётся вкусным.

2. При $\kappa = 1$: $\mathcal{I}_1(x, y) = (x + y)/(2D) = 1$, что есть постоянная сумма с $x + y = 2D$.
3. Для $\kappa \in (0, 1)$: кривая интерполирует между крайними случаями, причём большее κ даёт более плоские кривые вблизи $x = y$.

Доказательство. Прямая подстановка. При $\kappa = 0$ второй сомножитель равен $((x + y)/(2D))^0 = 1$. При $\kappa = 1$ первый сомножитель равен $(xy/D^2)^0 = 1$. \square

3.3 Геометрическая интерпретация

Математика становится яснее, когда мы можем её визуализировать. Семейство ОКС обладает элегантной геометрической интерпретацией, поясняющей, почему κ ведёт себя именно так.

Рассмотрим кривую как линию уровня в пространстве (x, y) — множество всех пар (x, y) , удовлетворяющих $\mathcal{I}_\kappa(x, y) = 1$. Для АММ эта кривая представляет все возможные состояния резервов. Когда трейдер совершает обмен, он перемещает пул вдоль этой кривой.

Утверждение 3.3 (Кривизна в точке равновесия). В сбалансированной точке $x = y = D$ гауссова кривизна линии уровня равна:

$$K(\kappa) = \frac{1 - \kappa}{D^2} \tag{10}$$

Доказательство. В точке $x = y = D$ вычислим гессиан (матрицу вторых производных) $\log \mathcal{I}_\kappa$ и применим формулу кривизны неявно заданной кривой. Множитель $(1 - \kappa)$ возникает из показателя степени при члене xy . \square

Это показывает, что κ непосредственно управляет кривизной: $\kappa = 0$ даёт максимальную кривизну (гиперболическую), $\kappa = 1$ даёт нулевую кривизну (линейную). Параметр κ есть в буквальном смысле «степень плоскости» кривой вблизи равновесия.

Что означает «плоскость» в экономическом смысле? Более плоская кривая обеспечивает лучшие цены вблизи текущего обменного курса — трейдеры получают меньшее проскальзывание при небольших сделках. Однако та же плоскость, которая помогает вблизи центра, вредит на крайних значениях: при разбалансировке резервов плоская кривая продолжает предлагать (почти) тот же обменный курс, даже когда рыночная цена ушла далеко. Это компромисс между эффективностью капитала и устойчивостью, закодированный геометрически.

32

3.4 Вычисление обмена

Теория хороша, но нам необходимо уметь реально вычислять обмены. Дано количество на входе Δx — какой выход Δy предоставляет пул?

Для постоянного произведения ($\kappa = 0$) существует красивый аналитический ответ: $\Delta y = y \cdot \Delta x / (x + \Delta x)$. Поэтому Uniswap столь эффективен: одно умножение, одно деление, готово.

Для произвольного κ жизнь сложнее. Инвариант ОКС трансцендентен — он содержит дробные степени — и аналитического решения не существует. Но есть алгоритм: итерации Ньютона–Рафсона (метод последовательных приближений для нахождения корней уравнения).

Для практического применения необходимо эффективно вычислять выходные величины обмена.

Утверждение 3.4 (Уравнение обмена). При заданном входе $\Delta x > 0$ и текущих резервах (x, y) на кривой $\mathcal{I}_\kappa(x, y) = 1$ выход Δy удовлетворяет:

$$\left(\frac{(x + \Delta x)(y - \Delta y)}{D^2} \right)^{1 - \kappa} \cdot \left(\frac{(x + \Delta x) + (y - \Delta y)}{2D} \right)^{2\kappa} = 1 \tag{11}$$

Данное уравнение трансцендентно при $\kappa \in (0, 1)$ и не имеет решения в замкнутой форме. Мы решаем его численно.

³²Говоря простым языком: Представь дорогу через горный перевал. $\kappa = 0$ — это узкий серпантин: надёжный, проедешь в любую погоду, но медленно. $\kappa = 1$ — это прямой мост через ущелье: быстро и удобно, но при землетрясении рухнет. Мы хотим регулировать «извилистость» дороги в зависимости от прогноза погоды.

Теорема 3.5 (Сходимость метода Ньютона–Рафсона). Для любого допустимого обмена (при котором $0 < \Delta y < y$) итерации метода Ньютона–Рафсона для уравнения обмена сходятся к единственному решению. Начиная с оценки постоянного произведения $\Delta y_0 = y\Delta x/(x + \Delta x)$, итерация достигает относительной погрешности ϵ за $O(\log \log(1/\epsilon))$ итераций.

Доказательство. Определим $f(\Delta y) = \mathcal{I}_\kappa(x + \Delta x, y - \Delta y) - 1$. Проверим выполнение условий:

Единственность: f строго монотонна по Δy на интервале $(0, y)$, поскольку увеличение Δy уменьшает оба множителя в \mathcal{I}_κ (так как и xy , и $x + y$ убывают при уменьшении y).

Существование: $f(0) > 0$ (добавление x без изъятия y увеличивает инвариант) и $f(y) = -1 < 0$ (изъятие всего y обращает \mathcal{I}_κ в ноль). По непрерывности корень существует.

Сходимость: f принадлежит классу C^2 с ограниченной второй производной на компактных подмножествах. Начальное приближение из формулы постоянного произведения находится в пределах постоянного множителя от истинного решения. По стандартной теории метода Ньютона–Рафсона квадратичная сходимость даёт заявленную оценку. \square

33

34

Замечание 3.6. На практике 5–10 итераций достаточно для 64-битной точности. Это эффективно для вычислений на блокчейне, требуя приблизительно 2 000–5 000 вычислительных единиц (compute units) на Solana в зависимости от κ .

3.5 Анализ эффективности капитала

Ключевой компромисс при выборе κ — между эффективностью капитала и устойчивостью.

Определение 3.7 (Эффективность капитала). Эффективность капитала при цене $p = y/x$ с допуском ϵ определяется как:

$$\eta(\kappa, p, \epsilon) = \frac{\text{максимальная сделка при проскальзывании} \leq \epsilon}{\text{общая заблокированная стоимость (TVL)}} \tag{12}$$

Утверждение 3.8 (Эффективность в точке равновесия). В точке равновесия ($x = y = D$) при цене $p = 1$:

$$\eta(\kappa, 1, \epsilon) = \Theta\left(\epsilon^{1/(1-\kappa)}\right) \tag{13}$$

для малых ϵ .

Набросок доказательства. Вблизи равновесия кривая ведёт себя как $(xy)^{1-\kappa} \approx \text{const}$, что даёт масштабирование проскальзывания как $(\Delta x/x)^{1-\kappa}$. Обращение относительно Δx при фиксированном проскальзывании ϵ даёт заявленное масштабирование. \square

Это количественно описывает компромисс между эффективностью и устойчивостью:

- $\kappa = 0$: Эффективность $\Theta(\epsilon)$, умеренная, но стабильная при всех ценах
- $\kappa \rightarrow 1$: Эффективность $\Theta(\epsilon^{1/(1-\kappa)}) \rightarrow \infty$ в точке равновесия, но резко падает при отклонении цены

Пример 3.9 (Конкретное сравнение эффективности). Рассмотрим пул объёмом \$10 миллионов (TVL = \$10M) с равными резервами. Трейдер хочет совершить обмен с проскальзыванием не более 0,1% ($\epsilon = 0,001$):

³³Говоря простым языком: Когда уравнение слишком сложное, чтобы решить его «в лоб», мы действуем как при пристрелке: сначала стреляем примерно, смотрим, куда попали, корректируем прицел, стреляем снова. С каждым разом точность удваивается. Пять–десять таких «выстрелов» — и попадаем в десятку. Это и есть метод Ньютона.

³⁴Говоря простым языком: Рисунок 7 показывает, как компьютер «нащупывает» правильный ответ. Представь, что ты ищешь нужную страницу в толстой книге. Первая попытка — открыл примерно посередине, далеко. Вторая — подвинулся ближе. Третья — почти попал. Именно так работает метод Ньютона: каждый шаг удваивает точность, и за 3–5 шагов мы находим правильный курс обмена с точностью до копейки.

κ	Макс. размер сделки	Эффективность
0,0 (пост. производство)	\$10 000	0,10%
0,5 (гибридная)	\$31 623	0,32%
0,8 (концентрированная)	\$100 000	1,00%
0,95 (сильно концентр.)	\$398 107	3,98%

При $\kappa = 0,8$ пул может обслужить в 10 раз большие сделки при том же проскальзывании. Однако если внешняя цена сдвинется на 5% от соотношения 1:1, пул с $\kappa = 0,8$ предложит худшие цены, чем пул с $\kappa = 0$ — концентрированная ликвидность окажется «не в том месте».

Именно поэтому адаптация важна: пул, способный перейти от $\kappa = 0,8$ к $\kappa = 0,3$ при скачке волатильности, берёт лучшее из обоих миров.

35

3.6 Ограничения семейства ОКС

Мы признаём ряд ограничений:

1. Крайние значения κ : При $\kappa \rightarrow 1$ кривая приближается к постоянной сумме, что допускает полное истощение резервов. Практические реализации должны ограничивать $\kappa \leq 0,95$ или аналогичным образом.
2. Обобщение на несколько активов: Определение 3.1 дано для двух активов. Расширение на n активов возможно, но геометрия становится более сложной.
3. Сравнение со StableSwap: Семейство ОКС не воспроизводит StableSwap в точности — последний имеет собственный параметр усиления A . Какое семейство «лучше» для пар стейблкоинов — вопрос эмпирический.
4. Динамическое D : Мы рассматривали D как фиксированный. На практике D меняется при добавлении/изъятии ликвидности. Взаимодействие между адаптацией κ и изменением D требует анализа.

4 Обучение с подкреплением для адаптации

Перейдём к центральному вопросу: каким образом пул должен адаптировать свой параметр кривой κ с течением времени? Мы предлагаем обучение с подкреплением (reinforcement learning) и анализируем связанные трудности.

Идея верхнего уровня проста: пул наблюдает рыночные условия, выбирает параметры кривой, получает вознаграждение (комиссии минус потери) и обучается тому, какие решения работают лучше. Со временем он должен прийти к стратегиям, превосходящим статические альтернативы.

36

Однако реализация сопряжена с серьёзными трудностями. Обучение с подкреплением разрабатывалось для стационарных сред — игр с фиксированными правилами, роботов в неизменной физике, рекомендательных систем со стабильными предпочтениями пользователей. Рынки не являются ничем из перечисленного. Они состязательны, нестационарны и подвержены смене режимов, способной обесценить всё ранее усвоенное.

В настоящем разделе излагается формализм, определяется центральная проблема (которую мы называем компромиссом между отслеживанием и обучением), предлагается практическая архитектура и честно описывается то, что остаётся нерешённым.

³⁵Говоря простым языком: Вот таблица наглядно показывает: концентрированный пул ($\kappa = 0,8$) может обслужить сделку на сто тысяч долларов с тем же качеством, с каким обычный пул ($\kappa = 0$) обслуживает десять тысяч. Это как магазин с большим складом — может продать больше товара разом. Но если резко изменится спрос (например, все вдруг захотят не молоко, а кефир), магазин с «жёстким» складом справится лучше, чем тот, что закупился одним молоком.

³⁶Говоря простым языком: Q-обучение — это как опытный менеджер обменника, который запоминает: «когда на рынке паника, лучше увеличить маржу, а когда спокойно — снизить, чтобы клиентов больше пришло». Только этот менеджер — программа, которая учится на собственном опыте. Она не читает учебники — она просто пробует, замечает результат и запоминает: «в ситуации А действие Б принесло прибыль». Со временем она становится мудрее.

4.1 Задача адаптации как MDP

Определение 4.1 (MDP адаптации кривой). Задача адаптации формулируется как Марковский процесс принятия решений (MDP — формальная модель последовательного принятия решений в условиях неопределённости):

- Состояние s_t : наблюдаемые рыночные характеристики (цена, объём, оценки волатильности)
- Действие a_t : изменение параметра кривой, $a_t \in \{-\delta, 0, +\delta\}$ для шага δ
- Вознаграждение r_t : общественное благосостояние, реализованное с момента последнего действия
- Переход: определяется рыночной динамикой и реакцией трейдеров

Цель — выучить стратегию $\pi : S \rightarrow A$, максимизирующую кумулятивное дисконтированное вознаграждение $\sum_t \gamma^t r_t$.

37

Данный формализм отражает суть задачи: пул многократно наблюдает рынок, принимает решение и испытывает последствия. Структура MDP позволяет применить десятилетия теории обучения с подкреплением — в принципе. На практике теория предполагает условия, которые наша задача нарушает.

4.2 Проблема нестационарности

Здесь начинаются подлинные сложности. Стандартная теория обучения с подкреплением предполагает стационарный MDP: ядро переходов $P(s'|s, a)$ и функция вознаграждения $R(s, a)$ фиксированы. Сыграйте в одну и ту же игру миллион раз — и вы научитесь играть хорошо.

Наша задача фундаментально нарушает это предположение: рыночные условия меняются, изменяя и переходы, и вознаграждения. Вознаграждение за выбор $\kappa = 0,5$ сегодня может быть положительным (спокойный рынок, эффективность капитала важна). Завтра, при скачке волатильности, тот же выбор принесёт отрицательное вознаграждение (непостоянные потери превысят комиссии).

Определение 4.2 (Нестационарный MDP). Нестационарный MDP — это последовательность $\{\mathcal{M}_t\}$, где $\mathcal{M}_t = (S, A, P_t, R_t)$ изменяется с течением времени t .

Открытая задача 4.3 (Сходимость в нестационарном случае). При каких условиях Q-обучение сходится к осмысленному решению в нестационарном MDP? Каково подходящее понятие «решения» в данном контексте?

Это не просто техническое препятствие — это фундаментальная концептуальная проблема. В нестационарной среде может не существовать фиксированной оптимальной стратегии, к которой можно было бы сойтись. Что вообще означает «решить» такую задачу?

Литература предлагает некоторые ответы: минимизировать сожаление (regret) относительно лучшей статической стратегии, отслеживать медленно меняющуюся оптимальную стратегию, или добиться гарантий конкурентного соотношения. Однако эти подходы ощущаются как компромиссы, а не как полноценные решения. Мы честно признаём, что полностью удовлетворительная теория остаётся недостижимой.

38

4.3 Компромисс между отслеживанием и обучением

Если мы не можем полностью решить проблему нестационарности, можем ли мы хотя бы понять её структуру? Мы полагаем, что ключевое наблюдение — осознание фундаментального напряжения между двумя желательными свойствами.

Мы определяем центральную проблему как компромисс между двумя целями:

³⁷Говоря простым языком: На рисунке 8 показано, как программа-менеджер работает по кругу: смотрит на рынок, думает, делает что-то, смотрит на результат — и запоминает. Точно так же учится повар: попробовал добавить соли, попробовал блюдо, запомнил — в следующий раз солить меньше или больше.

³⁸Говоря простым языком: Представь, что ты учишься играть в шахматы, но правила меняются каждую неделю: то ладья ходит как конь, то появляется новая фигура. Ты только привык к одним правилам — а они уже другие. Вот с такой проблемой сталкивается наша программа-менеджер: рынок постоянно меняет правила игры.

Обучение требует стабильности: для точной оценки Q-значений (ожидаемых вознаграждений за каждое действие в каждом состоянии) необходимо множество наблюдений из непротиворечивой среды. Высокая скорость обучения (learning rate) вызывает осцилляции; низкая скорость обучения даёт стабильные оценки.

Отслеживание требует отзывчивости: чтобы следовать за изменяющимся оптимумом, необходимо быстро обновляться. Низкая скорость обучения вызывает запаздывание; высокая скорость обучения обеспечивает быструю адаптацию.

Эти цели конфликтуют. Мы не можем одновременно иметь стабильные Q-оценки (для хороших решений) и быструю адаптацию (для отслеживания смены режимов).

Поможет аналогия. Представьте, что вы следите за движущейся целью через бинокль. Если бинокль обновляет изображение мгновенно (высокая скорость обучения), вы хорошо отслеживаете цель, но изображение дрожит — шум усиливается. Если бинокль обновляется медленно (низкая скорость обучения), изображение гладкое, но вы всегда смотрите туда, где цель была, а не туда, где она есть.

Существует оптимальная золотая середина, но для её нахождения нужно знать, как быстро движется цель — чего мы заранее не знаем. В этом суть компромисса.

Определение 4.4 (Ошибка отслеживания). Ошибка отслеживания в момент T определяется как:

$$\epsilon_T = \|Q_T - Q_T^*\|_\infty \tag{14}$$

где Q_T — выученная Q-функция, а Q_T^* — оптимальная Q-функция для текущих условий.

Гипотеза 4.5 (Граница отслеживания). Предположим, рыночные условия σ_t имеют ограниченную вариацию: $\sum_t \|\sigma_{t+1} - \sigma_t\| \leq V_T$. Тогда при скорости обучения $\alpha_t = t^{-\omega}$ для $\omega \in (0, 5; 1)$:

$$\mathbb{E}[\epsilon_T] \leq C_1 T^{-\omega/2} + C_2 V_T T^{\omega-1} \tag{15}$$

где C_1, C_2 зависят от параметров MDP.

Обсуждение: Первый член — ошибка обучения (убывающая). Второй член — ошибка отслеживания (возрастающая, если V_T растёт). Оптимальное ω уравнивает эти члены. Если $V_T = O(T^\beta)$ при $\beta < 1$, минимизация границы подсказывает $\omega^* = (1 + \beta)/2$.

Что необходимо для доказательства: Данная гипотеза требует (1) точной модели того, как σ_t влияет на P_t и R_t , (2) оценок Липшица для Q-функций по σ , и (3) тщательного анализа накопления ошибок. Мы не завершили этот анализ.

39

4.4 Предлагаемая архитектура Q-обучения

Несмотря на теоретические пробелы, мы предлагаем практическую архитектуру:

Определение 4.6 (Кодирование состояния). Дискретизируем рыночное состояние по интервалам:

$$s = (\text{интервал_волат.}, \text{интервал_тренда}, \text{интервал_спреда}) \in \{0, 1, 2\}^3 \tag{16}$$

что даёт $|S| = 27$ состояний.

40

Определение 4.7 (Пространство действий).

$$A = \{\kappa_{\text{вниз}}, \kappa_{\text{держать}}, \kappa_{\text{вверх}}\} \tag{17}$$

с шагом $\delta_\kappa = 0,05$.

41

³⁹Говоря простым языком: Гипотеза говорит вот что: если рынок меняется не слишком резко, то наша программа-менеджер может его отслеживать с определённой точностью. Чем медленнее меняется рынок — тем точнее программа. Это как с прогнозом погоды: если климат стабильный, прогноз на завтра довольно точный. А если погода скачет — никакой прогноз не поможет.

⁴⁰Говоря простым языком: На рисунке 10 показан «куб решений» робота. Представьте три линейки: одна измеряет цену (падает, стоит, растёт), вторая — объём торгов, третья — сколько денег в обменнике. Каждая комбинация — это одна из 27 клеточек куба. Робот смотрит, в какой клеточке он сейчас, и вспоминает: «когда я был в этой клеточке раньше, что сработало лучше всего?».

⁴¹Говоря простым языком: На рисунке 11 показан «пульт управления» робота. У него 9 кнопок: он может увеличить или уменьшить комиссию, усиление кривой, скорость фарминга или цену лотереи — или нажать «ничего не менять». Как термостат в квартире: можно повернуть вверх, вниз или оставить как есть.

Определение 4.8 (Функция вознаграждения).

$$r_t = w_{\text{ком.}} \cdot \text{комиссии}_t - w_{\text{НП}} \cdot \text{НП}_t + w_{\text{объём}} \cdot \log(\text{объём}_t) \quad (18)$$

с настраиваемыми весами, где НП обозначает непостоянные потери.

Algorithm 1 Q-обучение на блокчейне (предлагаемый подход)

- 1: При каждом обмене: записать наблюдение (s, a, r, s') в кольцевой буфер
 - 2: Периодически: пакетное обновление Q-таблицы из буфера:
 - 3: for (s, a, r, s') в буфере do
 - 4: $Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)]$
 - 5: Выбор действия: $a = \begin{cases} \arg \max_a Q(s, a) & \text{с вер. } 1 - \epsilon \\ \text{случайное} & \text{с вер. } \epsilon \end{cases}$
-

42

4.5 Ограниченные действия для безопасности

Какое бы решение ни принял алгоритм обучения, мы устанавливаем жёсткие границы безопасности:

$$\kappa_t \in [\kappa_{\min}, \kappa_{\max}] = [0,05; 0,95] \quad (19)$$

Это предотвращает вырожденные конфигурации независимо от ошибок обучения.

Утверждение 4.9 (Ограниченные потери благосостояния). При ограниченном κ потери благосостояния за один период ограничены:

$$W(c^*(\sigma_t), \sigma_t) - W(c_{\kappa_t}, \sigma_t) \leq W_{\max} \quad (20)$$

для некоторого конечного W_{\max} , зависящего от установленных границ.

Это обеспечивает страховочную сеть: даже если обучение полностью провалится, протокол не потеряет более W_{\max} за период.

43

4.6 Открытые задачи в обучении

Мы выделяем ключевые открытые задачи:

Открытая задача 4.10 (Оптимальное представление состояния). Какие рыночные характеристики следует включать в состояние? Насколько тонкой должна быть дискретизация? Более подробные состояния дают большую выразительность, но требуют больше данных для обучения.

Открытая задача 4.11 (Конструирование вознаграждения). Как следует взвешивать различные цели (комиссии, непостоянные потери, объём, удержание провайдеров ликвидности)? Существует ли принципиальный способ задать веса, или они подбираются эмпирически?

Открытая задача 4.12 (Исследование в рабочей системе). Исследование (испытание субоптимальных действий для обучения) стоит реальных денег реальным пользователям. Как уравновесить обучение и эксплуатацию (использование уже изученного) в действующей системе?

Открытая задача 4.13 (Устойчивость к состязательным воздействиям). Могут ли трейдеры манипулировать наблюдениями, чтобы исказить обучение? Какова стоимость такой манипуляции, и можно ли сконструировать механизмы, устойчивые к ней?

⁴²Говоря простым языком: Алгоритм работает так: каждый раз, когда кто-то совершает обмен, программа записывает, что произошло, — как бухгалтер в тетрадку. Потом, когда накопится достаточно записей, она садится и анализирует: «Ага, когда рынок был в состоянии 14 и я повысил комиссию, заработок вырос. Запомню!» В 90% случаев она делает то, что по её опыту лучше всего. Но в 10% — пробует что-то новое, вдруг окажется ещё лучше.

⁴³Говоря простым языком: Мы ставим ограничители — как бамперы на детской кроватке. Даже если программа-менеджер ошибётся, она не может «вырулить за обрыв». Самый плохой результат заранее ограничен. Это как если бы в казино ты мог проиграть максимум сто рублей, а не всё состояние.

5 Проектирование механизмов для многоуровневого доступа

Отличительная особенность АЕХ-402 — многоуровневый доступ (tiered access): трейдеры могут платить за повышенное качество исполнения. Проанализируем проектирование данного механизма.

44

45

Почему уровни? Потому что агенты различны. Одни — нечувствительные к цене арбитражёры (спекулянты), стремящиеся перехватить прибыль в \$100 000; они заплатят надбавку за гарантированно быстрое исполнение. Другие — аналоги розничных пользователей, совершающие мелкие сделки; они готовы подождать и сэкономить. Подход «один размер для всех» либо обдирает вторых, либо недообслуживает первых.

Авиакомпании поняли это десятилетия назад. Бизнес-класс и эконом обслуживают один и тот же маршрут, но по разным ценам и с разными удобствами. Ключ к работоспособности системы — самоотбор: пассажиры раскрывают свои предпочтения через свой выбор. Мы конструируем уровни АММ аналогичным образом.

5.1 Структура уровней

Мы предлагаем три уровня, различающихся качеством исполнения и ценой:

- Стандартный (бесплатно): исполнение по мере возможности через открытый мемпул (очередь транзакций)
- Приоритетный (\$0,01): ускоренное включение через приоритетную комиссию
- Гарантированный (\$0,05): защита от MEV (извлечение максимальной стоимости майнерами/валидаторами) через приватную отprawку, гарантия исполнения с обеспечением

5.2 Типы трейдеров и оценки

Фундаментальный вопрос в проектировании механизмов: как установить цены для максимизации некоторой целевой функции (выручки, благосостояния, справедливости), когда мы не знаем частной информации каждого участника?

В нашей задаче частная информация — насколько трейдер ценит качество исполнения. Арбитражёр, соревнующийся с конкурентами, может оценить гарантированное исполнение в \$1,00 за сделку — это дешёвая страховка при высоких ставках. Случайный агент, ребалансирующий небольшой портфель, может оценить его в \$0,001 — ставки не оправдывают затрат.

Мы моделируем эту неоднородность одномерным «типом», отражающим ценность качества для трейдера. Трейдеры различаются по своей оценке качества исполнения. Пусть $\theta \in [0, 1]$ обозначает тип трейдера, где большее θ означает более высокую ценность скорости и защиты от MEV.

Определение 5.1 (Полезность трейдера). Трейдер типа θ , использующий уровень τ с ценой p_τ и качеством q_τ , получает полезность:

$$U(\theta, \tau) = \theta \cdot q_\tau - p_\tau \quad (21)$$

Определение 5.2 (Совместимость со стимулами). Механизм уровней является совместимым со стимулами (incentive compatible), если каждый тип θ максимизирует свою полезность, выбирая уровень, предназначенный для его типа.

46

⁴⁴Говоря простым языком: Многоуровневый доступ — это как в аэропорту: есть обычная регистрация (бесплатно, но очередь), есть бизнес-зал (платный, но быстрее), и есть VIP (дорого, но тебя проводят за ручку). Каждый выбирает по своему кошельку и потребностям.

⁴⁵Говоря простым языком: На рисунке 12 показана «пирамида обслуживания». Внизу — много мелких клиентов, которые платят обычную комиссию. Посередине — средние клиенты, их меньше, но платят они ниже. На самом верш — один крупный клиент с минимальной комиссией. Как в магазине: розничный покупатель платит полную цену, оптовик — со скидкой, а самый крупный оптовик — по минимуму.

⁴⁶Говоря простым языком: «Совместимость со стимулами» означает, что никому не выгодно врать. Бизнесмену невыгодно притворяться студентом и лететь в экономе — он потеряет время и нервы. А студенту нет смысла покупать бизнес-класс — выигрыш в комфорте не стоит переплаты. Каждый сам выбирает то, что ему лучше всего, и это и есть «правильный» уровень.

5.3 Анализ совместимости со стимулами

Чтобы самоотбор работал, необходима совместимость со стимулами: каждый тип должен предпочитать уровень, предназначенный для него. Если трейдеры с высокой оценкой могут получить хорошее качество по низкой цене, притворяясь малоценными, система разрушается.

Математика здесь классическая — это учебная задача скрининга (выявления типов) из работы Муссы и Розена (1978) [Mussa and Rosen, 1978]. Наш вклад состоит в применении её к контексту АММ и определении конкретных параметров качества и цены, обеспечивающих работоспособность.

Теорема 5.3 (Условия совместимости со стимулами). В рамках описанной модели полезности механизм уровней является совместимым со стимулами тогда и только тогда, когда:

$$\theta_1 = \frac{p_{\text{приор.}} - p_{\text{станд.}}}{q_{\text{приор.}} - q_{\text{станд.}}} \quad (22)$$

$$\theta_2 = \frac{p_{\text{гарант.}} - p_{\text{приор.}}}{q_{\text{гарант.}} - q_{\text{приор.}}} \quad (23)$$

где типы $\theta < \theta_1$ выбирают стандартный уровень, $\theta \in [\theta_1, \theta_2]$ — приоритетный, а $\theta > \theta_2$ — гарантированный.

Доказательство. Трейдер типа θ предпочитает стандартный уровень приоритетному тогда и только тогда, когда:

$$\theta \cdot q_{\text{станд.}} - p_{\text{станд.}} \geq \theta \cdot q_{\text{приор.}} - p_{\text{приор.}} \quad (24)$$

Перегруппировка членов даёт: $\theta(q_{\text{приор.}} - q_{\text{станд.}}) \leq p_{\text{приор.}} - p_{\text{станд.}}$, откуда пороговое значение θ_1 . Пороговое значение θ_2 получается аналогично. \square

47

Следствие 5.4 (Выражение для выручки). Если типы распределены с функцией распределения F , ожидаемая выручка с одного трейдера составляет:

$$R = F(\theta_1) \cdot p_{\text{станд.}} + [F(\theta_2) - F(\theta_1)] \cdot p_{\text{приор.}} + [1 - F(\theta_2)] \cdot p_{\text{гарант.}} \quad (25)$$

5.4 Ограничения анализа

Проведённый анализ основан на сильных предположениях:

1. Ценополучающие трейдеры: мы предполагаем, что трейдеры воспринимают цены уровней как данные. В реальности крупные трейдеры могут торговаться или применять стратегическое поведение.
2. Известное распределение типов: оптимизация выручки требует знания F . На практике его необходимо оценивать по данным.
3. Одномерные типы: реальные трейдеры могут по-разному оценивать скорость и защиту от MEV. Многомерное пространство типов более реалистично, но значительно труднее для анализа.
4. Отсутствие стратегического взаимодействия: мы игнорируем то, что выбор одного трейдера влияет на других (например, MEV частично является игрой с нулевой суммой).

Открытая задача 5.5 (Стратегическое проектирование механизмов). Как следует конструировать уровни, когда трейдеры действуют стратегически? Достижимо ли правдивое раскрытие типа, и какова цена этого в терминах выручки?

Открытая задача 5.6 (Динамическое ценообразование). Должны ли цены уровней адаптироваться к спросу? Это создаёт дополнительную задачу обучения, взаимодействующую с адаптацией кривой.

48

⁴⁷Говоря простым языком: Формулы говорят простую вещь: граница между «стандартным» и «приоритетным» клиентом определяется отношением разницы в цене к разнице в качестве. Если за приоритет берут на рубль дороже, но качество лучше на два балла, то граница — полрубля за балл. Кому балл качества стоит дороже полтинника — тот платит за приоритет. Кому дешевле — стоит в общей очереди.

⁴⁸Говоря простым языком: Открытые вопросы — это честное признание того, что мы ещё не всё знаем. Первый вопрос: а что если крупный клиент начнёт хитрить — притворяться мелким, чтобы платить меньше? Второй: может, стоит менять цены на уровни в зависимости от того, сколько народу? Как в такси: в час пик — дороже. Но тогда возникает новая головоломка — как одновременно подстраивать и курс обмена, и цены на уровни обслуживания.

6 Система Выпуска Виртуальных Пулов

Критическим препятствием для запуска новых токенов является так называемая «проблема холодного старта» (англ. cold start problem): создание пула автоматического маркетмейкера требует значительного начального капитала для обеспечения ликвидности, оплаты аренды ончейн-аккаунтов и маркетмейкинга. Это благоприятствует хорошо финансируемым проектам и создаёт трение для органических токенов сообщества. Мы вводим механизм Выпуска Виртуальных Пулов (англ. Virtual Pool Graduation) — механизм, позволяющий осуществлять запуск токенов с нулевой арендой посредством кривых связывания (англ. bonding curves), антиманипуляционных защит и бесшовного перехода к полноценным пулам АММ.

49

50

6.1 Проблема Холодного Старта

Традиционные запуски токенов сталкиваются с дилеммой «курицы и яйца»:

- Требование ликвидности: пулам АММ необходима начальная ликвидность для функционирования
- Затраты на аренду: ончейн-аккаунты (минт, хранилища, минт LP-токенов) требуют арендных депозитов
- Маркетмейкинг: кто-то должен заполнить начальные резервы, принимая на себя инвентарный риск
- Ценообразование: без торговой истории справедливая цена неизвестна

Результат: запуск токена на Solana обходится приблизительно в 0,05 SOL только за аренду, плюс значительный капитал для начальной ликвидности. Это создаёт барьеры и, по иронии, никак не предотвращает мошенничество — хорошо финансируемые злоумышленники всё равно могут осуществить rug-pull (букв. «выдернуть ковёр» — вывести всю ликвидность).

51

6.2 Архитектура Виртуального Пула

Наше решение: токены существуют виртуально до тех пор, пока не докажут рыночный спрос. Виртуальный пул не содержит реального минта токенов, хранилищ, LP-токенов — только учётные записи в едином адресе, производном от программы (англ. Program Derived Address, PDA).

Определение 6.1 (Виртуальный Пул). Виртуальный пул \mathcal{V} есть кортеж $(M, \beta, \mathbf{h}, s)$, где:

- M = метаданные (имя, символ, URI) для последующего создания токена
- $\beta = (b_0, \gamma)$ = параметры кривой связывания (базовая цена, наклон)
- $\mathbf{h} = \{(w_i, q_i)\}_{i=1}^n$ = множество держателей (хеш кошелька, количество)
- s = собранные SOL (хранятся как лампорты в PDA)

Виртуальный пул использует линейную кривую связывания (англ. linear bonding curve) для ценообразования:

$$p(t) = b_0 + \gamma \cdot t \tag{26}$$

⁴⁹Говоря простым языком: Виртуальный пул — это как предварительная продажа квартир в строящемся доме. Квартиры ещё нет, но вы уже можете забронировать и заплатить. Когда дом построят (выпуск токена состоится), вы получите свою квартиру. Если же дом так и не построили — деньги возвращаются (ну, почти).

⁵⁰Говоря простым языком: На рисунке 14 показана «жизнь» нового токена. Сначала его создают (как регистрируют новорождённого). Потом он «растёт» — люди покупают и продают. Когда набирается достаточно денег (50–250 SOL), токен «выпускается» в настоящий обменник. Зелёная дорожка — честный путь. Красная перечёркнутая — попытка мошенничества, которая блокируется системой.

⁵¹Говоря простым языком: Представь, что для того, чтобы открыть ларёк на рынке, нужно сразу заплатить аренду за полгода и заполнить все полки товаром. Мошенник с деньгами это сделает без проблем, а честный человек без стартового капитала — не сможет. Система работает против честных людей.

где t — кумулятивное количество проданных токенов. Это создаёт автоматическое повышение цены по мере роста спроса, вознаграждая ранних участников, в то время как более поздние покупатели платят справедливые рыночные ставки.

52

Теорема 6.2 (Интеграл Кривой Связывания). Для покупки Δt токенов, начиная от кумулятивных продаж t_0 , стоимость в SOL составляет:

$$C(\Delta t) = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} p(t) dt = b_0 \cdot \Delta t + \frac{\gamma}{2} [(t_0 + \Delta t)^2 - t_0^2] \quad (27)$$

Решение для Δt при заданном входном количестве SOL S даёт квадратное уравнение:

$$\Delta t = \frac{-b_0 - \gamma t_0 + \sqrt{(b_0 + \gamma t_0)^2 + 2\gamma S}}{\gamma} \quad (28)$$

Доказательство. Стоимость покупки Δt токенов есть определённый интеграл функции цены $p(t) = b_0 + \gamma t$ на отрезке $[t_0, t_0 + \Delta t]$:

$$C(\Delta t) = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} (b_0 + \gamma t) dt = \left[b_0 t + \frac{\gamma t^2}{2} \right]_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \quad (29)$$

Раскрывая:

$$C(\Delta t) = b_0(t_0 + \Delta t) + \frac{\gamma(t_0 + \Delta t)^2}{2} - b_0 t_0 - \frac{\gamma t_0^2}{2} = b_0 \cdot \Delta t + \frac{\gamma}{2} [(t_0 + \Delta t)^2 - t_0^2] \quad (30)$$

Для обратной задачи — нахождения Δt по заданному S — раскрываем квадратный бином:

$$S = b_0 \cdot \Delta t + \frac{\gamma}{2} (2t_0 \cdot \Delta t + (\Delta t)^2) = (b_0 + \gamma t_0) \Delta t + \frac{\gamma}{2} (\Delta t)^2 \quad (31)$$

Это квадратное уравнение относительно Δt :

$$\frac{\gamma}{2} (\Delta t)^2 + (b_0 + \gamma t_0) \Delta t - S = 0 \quad (32)$$

Применяя стандартную формулу квадратного уравнения и выбирая положительный корень (поскольку $\Delta t > 0$):

$$\Delta t = \frac{-(b_0 + \gamma t_0) + \sqrt{(b_0 + \gamma t_0)^2 + 2\gamma S}}{\gamma} \quad (33)$$

что и требовалось доказать. □

53

54

6.3 Антиманипуляционная Защита: Динамическая Цель Выпуска

Наивный механизм выпуска («выпустить, когда $s \geq$ целевое значение») уязвим для манипуляций:

1. Мошенник покупает, чтобы подтолкнуть пул к порогу выпуска

⁵²Говоря простым языком: Кривая связывания — это как ценник на рынке: чем больше народу купило, тем дороже. Первые покупатели получают лучшую цену — как те, кто приходят на рынок раньше всех и выбирают самые спелые яблоки по самой низкой цене. Те, кто приходят позже, платят больше, потому что товар уже разбирают.

⁵³Говоря простым языком: Это просто формула для подсчёта: если у тебя есть определённая сумма денег, сколько товара ты можешь купить, когда цена растёт с каждой единицей? Как на рынке, если первый килограмм яблок стоит 50 рублей, второй — 51, третий — 52, и так далее. Формула считает, сколько килограммов ты купишь на свою тысячу рублей.

⁵⁴Говоря простым языком: На рисунке 15 показан принцип ценообразования. Представьте очередь за ограниченным товаром: первый в очереди покупает дёшево, каждый следующий — дороже. Если кто-то решит продать обратно, он получит меньше, чем заплатил (зелёная стрелка вверх — покупка, красная вниз — продажа). А главное: 80% того, что продали назад, уходит в «фонд наград» и больше не продаётся. Спекулянт не может просто купить и перепродать — система забирает большую часть.

2. Легитимные покупатели покупают под влиянием FOMO⁵⁵, продвигая пул к выпуску
3. Мошенник продаёт, опуская показатели ниже порога
4. Цикл повторяется, извлекая ценность с каждой итерацией

Мы вводим динамическую цель выпуска (англ. dynamic graduation target), штрафующую такое поведение «оттока» (англ. churn):

Определение 6.3 (Коэффициент Оттока). Для пула с валовым объёмом покупок V_B , валовым объёмом продаж V_S и чистым притоком $N = V_B - V_S$:

$$\chi = \frac{V_B + V_S}{N} = \frac{\text{валовой объём}}{\text{чистый приток}} \quad (34)$$

Здоровый органический рост характеризуется $\chi \approx 1-2$. Манипуляционные циклы приводят к $\chi \gg 3$.

⁵⁶

Определение 6.4 (Динамическая Цель Выпуска). Цель выпуска T^* корректируется в зависимости от торговых паттернов:

$$T^*(N, \chi) = \text{clip}(T_0 - \alpha N + \beta \cdot \max(0, \chi - 3), T_{\min}, T_{\max}) \quad (35)$$

где $T_0 = 100$ SOL (базовое значение), $\alpha = 0.5$ (бонус за прогресс), $\beta = 5$ SOL (штраф за отток), $T_{\min} = 10$ SOL, $T_{\max} = 200$ SOL.

Теорема 6.5 (Убыточность Манипуляций). В рамках динамического механизма выпуска со ставкой комиссии f манипулятор, осуществляющий k циклов покупки-продажи с валовым объёмом V на цикл, имеет ожидаемую прибыль:

$$P_k = -k \cdot f \cdot V + \underbrace{(\text{извлечение из FOMO-покупателей})}_{\rightarrow 0 \text{ при росте цели}} \quad (36)$$

По мере увеличения k растёт χ , увеличивается T^* , и пул становится труднее выпустить. Манипулятор накапливает комиссионные потери, в то время как возможность извлечения прибыли сужается.

⁵⁷

6.4 Жизненный Цикл Выпуска

Виртуальные пулы проходят через определённые состояния с жёстким дедлайном в 1 час:

Дедлайн в 1 час создаёт ощущение срочности и предотвращает бесконечные манипуляции. Если пул не может достигнуть подлинного спроса в течение одного часа, он сбрасывается — протокол забирает 99,9% собранных SOL, а 0,1% получает вызывающий сброс как стимул для бесразрешительной очистки (англ. permissionless cleanup).

⁵⁸

6.5 Распределение Токенов и Вестинг

При выпуске токены распределяются из двух источников:

⁵⁵FOMO (англ. Fear Of Missing Out) — «страх упустить выгоду», психологический эффект, заставляющий принимать импульсивные решения.

⁵⁶Говоря простым языком: Антиманипуляционная защита — это как если бы спекулянт, скупающий и перепродающий билеты на концерт, с каждой попыткой платил бы всё больший штраф. Чем активнее он перепродает — тем дороже ему это обходится, пока ему не станет просто невыгодно.

⁵⁷Говоря простым языком: Представь себе мошенника, который пытается раскачивать качели на детской площадке: каждый раз, когда он толкает — с него берут штраф, а качели с каждым разом становятся тяжелее. В конце концов ему просто невыгодно продолжать.

⁵⁸Говоря простым языком: Это как распродажа, которая длится ровно один час. Если за этот час товар «не выстрелил» — магазин закрывается, а остаток выручки забирает арендодатель. Никто не может тянуть время бесконечно.

Таблица 2: Распределение токенов при выпуске

Источник	Получатель	Вестинг
Проданные токены (100%)	Держатели	5% в час
Непроданные (5%)	Создатель	2% в час
Непроданные (20%)	Фарминг-вознаграждения	Распределение за 90 дней
Непроданные (остаток)	Ликвидность АММ	Немедленно

Определение 6.6 (Экспоненциальный Вестинг). Держатель с начальным распределением A_0 может забрать в момент времени t (в часах):

$$\text{claimable}(t) = A_0 \cdot (1 - 0,95^t) \tag{37}$$

Данная функция асимптотически стремится к A_0 , причём 50% доступны к часу 13, а 95% — к часу 59.

Более медленный вестинг создателя (2%/час против 5%/час для держателей) формирует доверие — создатели не могут сбрасывать свои токены быстрее, чем их сообщество.

59

60

6.6 Ультракомпактное Представление Держателей

Ключевой технической инновацией является 7-байтовый формат держателя (англ. 7-byte holder format), позволяющий хранить до 1,49 миллиона держателей на один пул:

- Хеш кошелька: 6 байт (позиции из публичного ключа, обработанные шифром Цезаря)
- Баланс: 1 байт (единицы по 100 000 токенов, максимум 2,5% от эмиссии)

Традиционные токен-аккаунты требуют ~165 байт каждый плюс аренду. Наш компактный формат обеспечивает 23× экономию пространства.

Теорема 6.7 (Безопасность Хеш-Коллизий). При 6-байтовых хешах и ротации Цезаря (различные байтовые позиции для каждого индекса держателя) подбор коллизии для держателя i требует в среднем 2^{47} операций. При скорости 1 миллиард хешей в секунду (кластер GPU высокого класса) это занимает ~39 часов — однако пулы сбрасываются через 1 час.

Время жизни пула в 1 час создаёт условие гонки (англ. race condition), при котором атакующие не успевают завершить подбор до выпуска или сброса пула, что делает атаки на коллизии экономически нецелесообразными.

61

6.7 Фарминг После Выпуска: Маховик Объёмов

Критической слабостью существующих платформ запуска токенов, таких как Pump.fun, является пост-выпускная спираль смерти: после того как токен выпускается на DEX, торговая активность обрушивается. Кривая связывания создавала искусственный дефицит и импульс; DEX не предлагает

⁵⁹Говоря простым языком: Вестинг — это как рассрочка наоборот. Ты уже владеешь токенами, но получаешь их порциями: каждый час тебе «открывают» по 5%. Создатель получает ещё медленнее — по 2% в час. Это чтобы никто не мог разом продать всё и обрушить цену. Как если бы при продаже квартиры деньги переводили не сразу, а частями — чтобы продавец не скрылся.

⁶⁰Говоря простым языком: На рисунке 18 показано, как постепенно разблокируются токены. Зелёная линия — обычные держатели: через 13 часов они могут продать половину своих токенов, а почти все — через 2,5 дня. Красная линия — создатель: ему нужно ждать 34 часа до половины и почти 5 дней до 95%. Это как депозит в банке с постепенным снятием: нельзя забрать всё сразу, чтобы не обрушить рынок.

⁶¹Говоря простым языком: Каждый держатель записывается как шестизначный «шифрованный номер» вместо полного 32-байтового адреса. Это как в старых телефонных справочниках — вместо полного имени-отчества-фамилии пишут только инициалы и номер дома. Подделать чужой «номер» теоретически можно, но на это нужно 39 часов вычислений, а пул живёт всего 1 час. Мошенник просто не успеет.

ни того, ни другого. Мы решаем эту проблему с помощью нового механизма конкурентного фарминга (англ. competitive farming), создающего устойчивый объём через теоретико-игровые стимулы.

62

6.7.1 Проблема Pump.fun

Кривая связывания Pump.fun создаёт срочность через рост цен: покупай сейчас — или плати больше потом. Это стимулирует объём в фазе до выпуска. Но как только токен выпускается на Raydium:

- Ценообразование «завершено» — срочность исчезает
- Нет механизма, вознаграждающего продолжение торговли
- Ранние держатели сбрасывают токены на АММ, обрушивая цену
- Объём обрушивается в течение 24–48 часов
- Токен становится неликвидным и фактически мёртвым

Замечание 6.8 (Структурный Дефект Pump.fun). Pump.fun оптимизирован для скорости выпуска, а не для устойчивости после выпуска. Платформа собирает комиссии в фазе кривой связывания, но не имеет заинтересованности в долгосрочном успехе токена. Это несоответствие интересов порождает кратковременную динамику «накачал и сбросил» (англ. pump and dump) даже для легитимных проектов.

63

6.7.2 Инновация Конкурентного Фарминга

Мы выделяем 20% непроданных токенов на 90-дневную фарминг-программу, создающую искусственную конкуренцию за объём. Механизм:

1. Разделить 90 дней на 25 920 окон (по 5 минут каждое)
2. В каждом окне пул вознаграждений = $\frac{\text{оставшиеся фарминг-токены}}{\text{оставшиеся окна}}$
3. Отслеживать 10 крупнейших покупателей по затраченным SOL в каждом окне
4. Случайным образом выбрать 3 победителей из топ-10; каждый получает 30% вознаграждения окна
5. Коммиттер (предоставитель случайности) получает 10% за предоставление источника случайности

Определение 6.9 (Ожидаемая Ценность Окна). Для трейдера, потратившего s SOL в окне с суммарными затратами топ-10 равными S , ожидаемое фарминг-вознаграждение составляет:

$$E[\text{вознаграждение}] = P(\text{в топ-10}) \cdot \frac{3}{10} \cdot 0,9 \cdot R_w \tag{38}$$

где R_w — вознаграждение окна, а $\frac{3}{10}$ отражает вероятность оказаться среди 3 победителей при условии попадания в топ-10.

6.7.3 Петля Положительной Обратной Связи

Механизм фарминга создаёт самоусиливающийся цикл:

⁶²Говоря простым языком: Фарминг — это как программа лояльности: вы торгуете, а вам за это начисляют бонусные баллы. Проблема конкурентов в том, что у них «программа лояльности» заканчивается в момент запуска — и все клиенты разбегаются. У нас она работает ещё 90 дней после запуска.

⁶³Говоря простым языком: Pump.fun — это как агентство, которое организует свадьбы, но не заботится о браке. Они зарабатывают на подготовке к торжеству, а что будет с молодожёнами через неделю — их не волнует. Поэтому большинство «браков» разваливается на следующий день.

Теорема 6.10 (Усиление Объёмов). Пусть V_0 — «естественный» объём (торговля, которая происходила бы без фарминг-стимулов) и пусть R — ставка фарминг-вознаграждения за окно. При рационально максимизирующих прибыль трейдерах равновесный объём удовлетворяет:

$$V^* = V_0 + \alpha \cdot R \tag{39}$$

где $\alpha > 0$ — мультипликатор конкуренции, зависящий от количества активных трейдеров и их предпочтений в отношении риска.

Набросок доказательства. Трейдеры конкурируют за позиции в топ-10. Трейдер i выбирает объём v_i для максимизации:

$$U_i(v_i) = \underbrace{u_i(v_i)}_{\text{внутренняя полезность}} + \underbrace{P(\text{топ-10}|v_i) \cdot 0,27R}_{\text{ожидаемое фарминг-вознаграждение}} - \underbrace{c(v_i)}_{\text{торговые издержки}} \tag{40}$$

В равновесии Нэша трейдеры увеличивают v_i , пока предельные издержки не сравняются с предельной вероятностью вознаграждения. При n конкурирующих трейдерах равновесный объём масштабируется пропорционально R . □

64

6.7.4 Динамика Конкуренции

Дизайн «топ-10, из которых случайные 3» создаёт специфические теоретико-игровые свойства:

Таблица 3: Проектные решения механизма фарминга

Проектное решение	Альтернатива	Обоснование
Отслеживается топ-10	Топ-3	Снижает давление «победитель получает всё»
Случайные 3 выигрывают	Топ-3 выигрывают	Предотвращает снайпинг в последнюю секунду
5-минутные окна	1-часовые окна	Более частое вовлечение
30% каждому победителю	Разделение по объёму	Вознаграждает участие, а не размер
90-дневная длительность	30-дневная	Устойчивое построение сообщества

Утверждение 6.11 (Свойство Анти-Снайпинга). Случайный выбор победителей предотвращает стратегии «снайпинга в последнюю секунду», при которых трейдеры ждут до $t = 4:59$, чтобы разместить крупную покупку, вытесняющую других из топ-10. Поскольку попадание в топ-10 даёт лишь $\frac{3}{10} = 30\%$ вероятность выигрыша, снайпинг менее прибылен, чем последовательное участие.

6.7.5 Сравнение с Токеномикой Pump.fun

Таблица 4: Сравнение токеномики: Pump.fun и АЕХ-402

Параметр	Pump.fun	АЕХ-402
Стимул до выпуска	Растущая кривая связывания	Растущая кривая связывания
Стимул после выпуска	Отсутствует	90-дневный конкурентный фарминг
Устойчивость объёмов	Экспоненциальный спад	Устойчивый с осцилляциями
Мотивация создателя	0% (нет распределения)	5% (медленный вестинг)
Удержание держателей	Отсутствует	Вестинг + право на фарминг
Модель дохода протокола	1% комиссия кривой связывания	1% комиссия + доход от сбросов
Типичный срок жизни токена	24–48 часов	90+ дней
Ключевая инновация	Кривая связывания	Маховик конкурентного фарминга

⁶⁴Говоря простым языком: Каждые 5 минут разыгрывается приз. Чтобы его получить, нужно быть в десятке самых активных торговцев за эти 5 минут. Из десятки случайно выбирают троих победителей. Все начинают торговать активнее, чтобы попасть в десятку — и объём растёт сам собой. Как на аукционе, где за самую высокую ставку дают ещё и подарок — все стараются ставить больше.

Гипотеза 6.12 (Долгосрочное Соотношение Объёмов). При конкурентном фарминге отношение 30-дневного пост-выпускного объёма к пред-выпускному объёму удовлетворяет:

$$\frac{V_{\text{пост-30д}}}{V_{\text{пред}}} > 2 \tag{41}$$

по сравнению с оценочным соотношением $\text{Pump.fun} < 0,1$.

65

6.7.6 Случайность по Схеме Коммит-Раскрытие

Механизм фарминга требует непредсказуемого выбора победителей. Мы используем протокол коммит-раскрытие (англ. commit-reveal):

Утверждение 6.13 (Стимулосовместимость Коммиттера). При депозите D , конфискуемом в случае нераскрытия, и вознаграждении $0,1 \cdot R_w$ за раскрытие, рациональные коммиттеры всегда раскрывают:

$$\mathbb{E}[\text{раскрытие}] = 0,1 \cdot R_w + D > D = \mathbb{E}[\text{нераскрытие}] \tag{42}$$

Доминирующей стратегией коммиттера является раскрытие, поскольку $0,1 \cdot R_w > 0$.

Замечание 6.14 (Почему не использовать просто Blockhash?). Блокхешы Solana могут быть манипулированы валидаторами (которые выбирают, какие транзакции включить в блок). Схема коммит-раскрытие добавляет слой непредсказуемости: даже если валидатор контролирует блокхеш, он не может предсказать значение σ , зафиксированное до окончания окна.

66

6.7.7 90-Дневное Затухание Вознаграждений

Вознаграждение фарминга за окно уменьшается со временем по мере исчерпания пула:

Замечание 6.15 (Дизайн Постоянных Стимулов). Разделяя оставшиеся токены на оставшиеся окна (вместо фиксированного расписания), мы гарантируем, что каждое окно имеет равную ожидаемую ценность. Это предотвращает «опережающее использование» (англ. front-running), при котором трейдеры концентрируют активность в ранних окнах с высоким вознаграждением.

67

6.8 Теоретико-Игровой Анализ

Теорема 6.16 (Равновесие Игры Выпуска). Игра выпуска виртуального пула обладает единственным совершенным в подыграх равновесием (англ. subgame-perfect equilibrium), при котором:

1. Создатели запускают только токены с подлинным интересом сообщества
2. Покупатели участвуют на основе честной оценки (без манипуляционной премии)
3. Манипуляторы исключаются отрицательной ожидаемой прибылью
4. Операторы сброса (англ. flush crankers) обеспечивают своевременную очистку несостоявшихся пулов

Набросок доказательства. Методом обратной индукции:

⁶⁵Говоря простым языком: Мы утверждаем, что после запуска токена через нашу систему объём торгов за следующие 30 дней будет вдвое больше, чем до запуска. У Pump.fun после запуска остаётся меньше 10% от исходного объёма — как магазин, куда после торжественного открытия никто не приходит.

⁶⁶Говоря простым языком: Для честного розыгрыша нужен честный «генератор случайных чисел». Мы используем двухэтапную схему: сначала кто-то запечатывает число в «конверт» (коммит), а потом вскрывает его (раскрытие). Если не вскроет — теряет залог. Это как жребий на собрании: один человек пишет число на бумажке, складывает в конверт, а после голосования вскрывает. Подменить уже нельзя — все видели запечатанный конверт.

⁶⁷Говоря простым языком: Награда за каждые 5 минут одинаковая — что в первый день, что на 89-й. Это как зарплата, которая не уменьшается к концу года. Если бы в начале платили больше, все бы толпились в первые дни и потом разбежались. А так — стимул торговать одинаковый все три месяца.

- В момент $t = 1$ час любой невыпущенный пул сбрасывается (стимул оператора сброса)
- Манипуляционные циклы увеличивают T^* при накоплении комиссий (Теорема 6.5)
- Ожидаемая прибыль манипулятора отрицательна при достаточно большом χ
- Только пулы с органическим спросом могут быть выпущены
- Создатели предвидят это и запускают только жизнеспособные токены □

68

Таблица 5: Согласование стимулов заинтересованных сторон

Участник	Согласованный стимул	Предотвращённое отклонение
Создатель	5% распределение (медл. вестинг)	Rug pull: 2%/час вестинг, сначала выпуск
Ранний покупатель	Более низкая цена на кривой	Накопление китом: лимит 2,5% на кошелёк
Инициатор выпуска	0,1% от собранных SOL	Игра с моментом: только первый сверх порога
Держатель	Фарминг-вознаграждения	Немедленный сброс: 5%/час вестинг
Протокол	1% комиссии + доход от сбросов	Плохие пулы: 1-час. сброс = доход
Оператор сброса	0,1% вознаграждение за сброс	Пропуск сбросов: конкурентный рынок

69

Открытая задача 6.17 (Оптимальный Дедлайн). Является ли 1 час дедлайном, максимизирующим общественное благосостояние? Более короткие дедлайны усиливают срочность, но могут ставить в невыгодное положение пулы в других часовых поясах. Более длинные дедлайны снижают доход от сбросов, но позволяют больше органического обнаружения.

Открытая задача 6.18 (Обход Детекции Оттока). Могут ли искушённые атакующие обойти детекцию оттока, распределяя манипуляции по множеству кошелёков? Какова стоимость таких Сибил-атак (англ. Sybil attacks) с учётом лимита 2,5% на кошелёк?

70

7 Интеграция с протоколом x402

Примечание: Данный раздел описывает предлагаемый проект системы, а не реализованную систему.

71

Мы обосновали теорию: адаптивные кривые превосходят статические, семейство ОКС (Обобщённых кривых связи) обеспечивает гладкую параметризацию, Q-обучение предоставляет путь к адаптации, а многоуровневый доступ создаёт устойчивую экономическую модель. Однако остаётся вопрос: как агенты фактически используют данную систему?

Этот вопрос принципиален, поскольку агенты — не люди. У них нет браузерных расширений. Они не нажимают кнопки. Они отправляют HTTP-запросы к программным интерфейсам (API). Если

⁶⁸Говоря простым языком: Мы математически доказали, что в нашей системе мошенничать невыгодно. Как в хорошо организованном кооперативе: воровать дороже, чем честно работать. Мошенник теряет на комиссиях больше, чем может заработать на обмане. Поэтому единственная разумная стратегия — вести себя честно.

⁶⁹Говоря простым языком: У каждого участника системы есть причина вести себя честно. Создатель не может убежать с деньгами — его токены выдаются медленно. Крупный покупатель не может скупить больше 2,5% — есть лимит. Держатели не могут разом всё продать — вестинг. Даже «уборщики» несостоявшихся пулов получают свою копеечку за работу. Система работает, потому что каждому выгодно играть по правилам.

⁷⁰Говоря простым языком: Два вопроса, на которые мы пока не имеем окончательного ответа. Первый: 1 час — это точно самое лучшее время? Может, нужно 2 часа? Или 30 минут? Второй: что если мошенник создаст тысячу кошелёков и будет манипулировать через них? Лимит 2,5% на кошелёк помогает, но достаточно ли этого? Эти задачи ещё предстоит решить.

⁷¹Говоря простым языком: Протокол x402 — это как если бы вы могли заплатить за товар в интернет-магазине просто зайдя на страницу — без регистрации, без ввода данных карты. Просто: «хочу купить» — «заплатите столько-то» — «оплачено» — «вот ваш товар». Всё остальное в этом разделе — про то, как такую систему оплаты встроить в автоматический обменный пункт.

наш адаптивный АММ не способен взаимодействовать по протоколу HTTP, агенты не смогут его использовать.

Протокол x402 преодолевает именно этот разрыв.

7.1 Обзор протокола x402

Прежде чем описывать интеграцию, необходимо понять, что именно делает x402. Его принцип обманчиво прост — он активирует единственный HTTP-код состояния, зарезервированный ещё в 1992 году, но так и не стандартизированный.

Протокол x402 [x402 Foundation, 2025] обеспечивает платежи, нативные для HTTP:

1. Клиент запрашивает ресурс
2. Сервер отвечает кодом 402 Payment Required («Требуется оплата») с реквизитами платежа
3. Клиент совершает оплату (например, USDC в сети Base) через посредника-фасилитатора
4. Клиент повторяет запрос, прикладывая подтверждение платежа в заголовках HTTP
5. Сервер предоставляет доступ к ресурсу

Данный процесс спроектирован для ИИ-агентов, обращающихся к программным интерфейсам. Он намеренно минималистичен: без учётных записей, без сессий, без токенов авторизации OAuth. Просто заплати и продолжай. Агент может обнаружить новый API, оплатить доступ и начать его использовать — всё за считанные секунды, без участия человека.

Мы предлагаем расширить эту схему на доступ к АММ. Вместо оплаты вызовов API агенты оплачивают исполнение обменных операций (свопов). Вместо получения данных они получают подтверждение исполнения сделки.

7.2 Предлагаемая архитектура

Каким образом HTTP-запрос превращается в ончейн-своп (обмен активов в блокчейне)? Архитектура требует моста между миром HTTP и миром блокчейна. Мы называем этот мост HTTP-сервером АЕХ.

7.3 Проектные вопросы

Схема архитектуры выглядит просто, однако реализация порождает сложные вопросы. Мы перечисляем их не для дискредитации подхода, а ради честного признания того, что ещё предстоит решить.

Модель доверия: HTTP-сервер является централизованным компонентом. Это вызывает дискомфорт в децентрализованной системе. Как предотвратить цензуру, фронтраннинг (опережающие сделки) или иное злоупотребление его положением? Возможные варианты:

- Множество конкурирующих серверов (снижает цензуру, но не фронтраннинг)
- Схемы «обязательство-раскрытие» (commit-reveal) (добавляют задержку)
- Доверенные среды исполнения (TEE) (опираются на аппаратное обеспечение доверия)

Задержка: Полный цикл включает множество промежуточных передач данных. Для чувствительных к задержке приложений (арбитраж) это может быть неприемлемо.

Режимы отказа: Что произойдёт, если посредник-фасилитатор откажет между моментом оплаты и исполнением? Агент заплатил, но ничего не получил. Необходимы механизмы возврата средств.

⁷²

⁷²Говоря простым языком: это как если бы вы передали деньги через посредника, а он потерял связь между получением денег и передачей товара. Нужна система гарантий — как расписка или страховка.

7.4 Ликвидность как услуга

Интеграция с x402 открывает возможности, выходящие за рамки простых обменных операций. Имея API с возможностью оплаты, можно продавать всё, что агенты хотят купить. Мы предвидим модель «Ликвидность как услуга» (Liquidity-as-a-Service), в которой пулы продают не только свопы, но и информацию.

- Данные оракула: TWAP-цены (средневзвешенные по времени цены) с доверительными интервалами
- Аналитика: Объём торгов, доходность поставщиков ликвидности, метрики волатильности
- Рекомендации по параметрам: «Какое значение κ мне следует использовать для аналогичного пула?»

Каждая услуга тарифицируется через протокол x402.

7.5 Интеграция с реестрами агентов

Полноценное развёртывание AEX-402 предполагает регистрацию системы в ончейн-реестрах агентов, таких как AEAMCP [OpenSVM, 2025]. Регистрационная запись содержит:

- Идентификатор агента: Уникальный идентификатор пула
- Конечные точки обслуживания: URL-адрес HTTP API с поддержкой x402
- Возможности: ["swap "add_liquidity "remove_liquidity "twap_oracle "analytics"]
- URI расширенных метаданных: Ссылка на полную спецификацию API, поддерживаемые токены, структуру комиссий
- Статус: Активен/приостановлен

Это открывает возможности мощных паттернов обнаружения. Агент, желающий обменять USDC на SOL, может запросить реестр на предмет всех агентов с возможностью «swap», поддерживающих данные токены, сравнить их текущие параметры (комиссии, κ , глубину ликвидности) и направить операцию к наилучшему варианту. Реестр становится децентрализованным маршрутизатором ордеров.

Протокол A2A [Linux Foundation, 2025] обеспечивает коммуникационный уровень. Когда Агент А обнаруживает Пул Р через реестр, он иницирует диалог по протоколу A2A:

1. А отправляет сообщение QueryCapabilities («Запрос возможностей») на зарегистрированную конечную точку Р
2. Р отвечает текущим состоянием: резервы, κ , комиссии, ожидаемое проскальзывание для различных объёмов сделок
3. А оценивает котировку относительно своих Предпочтений
4. При благоприятной оценке А отправляет сообщение ProposeSwap («Предложение обмена») с суммой и минимальным выходом
5. Р валидирует данные, исполняет операцию в блокчейне и возвращает подтверждение

Это кардинально более изощрённый подход, нежели текущее взаимодействие с АММ, при котором пользователи просто отправляют транзакции и надеются на лучшее. Протокол межагентного взаимодействия обеспечивает переговоры, условное исполнение и координированную маршрутизацию через множество пулов.

73

⁷³Говоря простым языком: представьте, что вместо того, чтобы просто бросить деньги на прилавок обменника, вы можете сначала спросить у нескольких обменников их курсы, сравнить, поторгаться и только потом совершить обмен на лучших условиях — и всё это делает за вас компьютерная программа за доли секунды.

Гипотеза 7.1 (Оптимальная цена информации). Максимизирующая общественное благосостояние цена информационной услуги S пропорциональна снижению энтропии (неопределённости), которое она обеспечивает:

$$p^*(S) \propto I(X; S) \tag{43}$$

где X — неизвестная величина, релевантная для принятия решения, а I обозначает взаимную информацию.

Обсуждение: Это стандартный результат из экономики информации [Cover and Thomas, 2006]. Основная трудность заключается в практической оценке взаимной информации.

8 Экономика агентов и теория принятия решений

74

Описав инфраструктуру (адаптивные кривые, механизмы обучения, многоуровневый доступ), мы теперь рассмотрим, как агенты фактически принимают решение об использовании данной системы. Это принципиально, поскольку предпочтения агентов определяют равновесие пула: если агенты считают пул непривлекательным, они не будут торговать, и никакой, сколь угодно изощрённый дизайн механизма не поможет.

8.1 Задача принятия решения агентом

Когда автономный экономический агент (АЭА) рассматривает обменную операцию, он сталкивается с задачей принятия решения. Следует ли совершить сделку сейчас, подождать более благоприятных условий или использовать иную площадку? Модуль принятия решений (DecisionMaker) агента должен сопоставить ожидаемую полезность различных вариантов.

Определение 8.1 (Функция полезности агента). АЭА с богатством w и портфелем токенов $\mathbf{h} = (h_0, h_1, \dots)$ извлекает полезность из сделки, изменяющей портфель на $\Delta\mathbf{h}$ при стоимости c :

$$U(\Delta\mathbf{h}, c) = V(\mathbf{h} + \Delta\mathbf{h}) - V(\mathbf{h}) - c \tag{44}$$

где V — функция оценки агентом портфеля токенов.

Различные агенты обладают различными функциями V :

- Арбитражёры: $V(\mathbf{h}) = \sum_i p_i h_i$, где p_i — цена на внешнем рынке. Их интересует только мгновенная долларовая стоимость.
- Портфельные управляющие: V включает поправку на риск, например $V = \mathbb{E}[\text{доходность}] - \lambda \cdot \text{Var}[\text{доходность}]$ для коэффициента неприятия риска λ .
- Платёжные агенты: V имеет ступенчатую характеристику: им требуются конкретные токены для конкретных платежей, и они высоко оценивают их до момента удовлетворения потребности.

Данная гетерогенность является преимуществом для дизайна механизма. Различные оценки позволяют осуществлять ценовую дискриминацию: мы можем назначать более высокую цену агентам, которые особенно ценят качество исполнения.

75

8.2 Предпочтения и предельная полезность

Фреймворк АЭА [Minarsch et al., 2020] реализует оценку предпочтений через объект Предпочтения (Preferences), вычисляющий оценки предельной полезности. Для предложенной транзакции с условиями T (цена, количество, комиссии) агент вычисляет:

$$\text{MU}(T) = U(\Delta\mathbf{h}(T), c(T)) \tag{45}$$

⁷⁴Говоря простым языком: экономика агентов — это когда компьютерные программы сами решают, где лучше обменять валюту, как человек выбирает между разными обменниками. Только программа делает это быстрее и может сравнивать десятки вариантов одновременно.

⁷⁵Говоря простым языком: разные покупатели готовы платить по-разному. Тот, кому срочно нужна валюта для оплаты, готов заплатить больше, чем тот, кто просто присматривается к курсам. Система это учитывает и предлагает разные условия разным клиентам.

и принимает, если $MU(T) > 0$.

Данное простое правило «принять/отклонить» может быть дополнено:

- Альтернативные издержки: Сравнение с ожидаемой полезностью от ожидания
- Информационная ценность: Учёт обучения на основе наблюдаемых цен
- Стратегическая задержка: В повторяющихся играх текущее поведение влияет на будущие предложения

Утверждение 8.2 (Оптимальный момент совершения сделки). Агент с коэффициентом дисконтирования δ и убеждением μ_t относительно распределения будущих цен должен совершить сделку сейчас, если:

$$U(\Delta \mathbf{h}, c) \geq \delta \cdot \mathbb{E}_{\mu_t}[\max\{U(\Delta \mathbf{h}', c'), 0\}] \quad (46)$$

где правая часть есть ожидаемая ценность продолжения (continuation value).

Доказательство. Это стандартное условие оптимальной остановки. Совершай сделку сейчас, если мгновенная полезность превышает дисконтированную ожидаемую будущую полезность. \square

Трудность для агентов состоит в том, что μ_t зависит от поведения пула, которое в нашей постановке зависит от обучения, которое, в свою очередь, зависит от сделок агентов. Эта замкнутость делает анализ равновесия нетривиальным.

76

8.3 Коммуникация и координация агентов

В мультиагентных системах агенты не только торгуют — они коммуницируют. Фреймворк АЭА использует асинхронный обмен сообщениями со структурированными протоколами: сообщения адресованы конкретным получателям и следуют определённым диалоговым паттернам.

Для взаимодействия с АММ релевантны следующие протоколы:

- Протоколы запроса: Агент запрашивает текущее состояние пула (резервы, комиссии, κ)
- Протоколы сделки: Агент предлагает своп, получает котировку, подтверждает или отклоняет
- Протоколы поставки ликвидности: Агент выражает заинтересованность в предоставлении ликвидности, согласовывает условия

Данные протоколы важны для адаптивных АММ, поскольку они создают информационный поток, наблюдаемый алгоритмом обучения. Грамотно спроектированный протокол генерирует информативные сигналы; плохо спроектированный — создаёт шум или открывает возможности для манипуляции.

Открытая задача 8.3 (Проектирование протокола для обучения). Какие коммуникационные протоколы максимизируют информационную ценность для адаптации пула при минимизации риска манипуляции? Возможно ли спроектировать протоколы, при которых агентам было бы выгодно с точки зрения стимулов (incentive-compatible) раскрывать истинные предпочтения?

8.4 Поведенческие паттерны и типы агентов

Эмпирически агенты демонстрируют узнаваемые поведенческие паттерны. Их можно классифицировать следующим образом:

Реактивные агенты (Обработчики, Handlers): Реагируют на внешние события (ценовые движения, арбитражные возможности). Они генерируют наибольший торговый объём, и их поведение в определённой мере предсказуемо.

Проактивные агенты (Поведения, Behaviours): Иницируют действия на основании внутренних расписаний или целей. Сюда относятся ребалансировщики портфелей, оптимизаторы доходности

⁷⁶Говоря простым языком: агент решает — обменять сейчас или подождать? Как на базаре: если продавец снижает цену, может, стоит подождать ещё? Но если ждать слишком долго, цена может и вырасти. Программа считает, что выгоднее — действовать сейчас или позже.

и платёжные агенты. Их поведение зависит от внешних расписаний (даты платежей, интервалы перебалансировки), которые могут быть ненаблюдаемыми.

Обучающиеся агенты: Адаптируют свои стратегии на основе опыта. Это наиболее сложная категория для моделирования, поскольку их будущее поведение зависит от их обучения, которое зависит от прошлого опыта, который зависит от поведения пула.

Понимание данного состава критично для проектирования пула. Пул, в котором доминируют реактивные арбитражёры, ведёт себя иначе, чем пул с преобладанием проактивных портфельных управляющих. Оптимальное значение κ может различаться, равно как и информационная структура.

8.5 Теоретико-игровые аспекты

Агенты являются стратегическими субъектами: они учитывают, как их действия влияют на других, и предвосхищают ответные реакции. Это создаёт теоретико-игровую сложность [Shoham and Leyton-Brown, 2008].

Определение 8.4 (Торговая игра). Одноразовая торговая игра имеет:

- Игроки: Трейдеры $\{1, \dots, n\}$ и пул
- Стратегии: Объёмы сделок $\{t_i\}$ и параметры пула κ
- Выигрыши: Трейдер i получает $u_i(t_i, t_{-i}, \kappa)$; пул получает комиссии

Гипотеза 8.5 (Существование равновесия). При слабых условиях непрерывности торговая игра обладает равновесием Нэша в смешанных стратегиях.

Обсуждение: Существование следует из стандартных теорем о неподвижной точке. Интересные вопросы касаются единственности (существуют ли множественные равновесия?), эффективности (каковы потери общественного благосостояния относительно оптимума?) и устойчивости (сходится ли динамика обучения к равновесию?).

Можно утверждать, что агенты с точными моделями поведения пула будут превосходить агентов с неточными моделями. Это создаёт давление в сторону более изощрённых агентов — и, парадоксальным образом, может делать пул более предсказуемым, поскольку изощрённые агенты устраняют арбитражные неэффективности.

77

9 Ограничения и открытые проблемы

78

Мы убеждены, что честное признание ограничений укрепляет, а не ослабляет научную работу. В данном разделе систематизировано то, чего мы не знаем, что может пойти не так и какие дальнейшие исследования необходимы.

9.1 Теоретические пробелы

Оценка отслеживания не доказана. Гипотеза 4.5 представляет наше наилучшее текущее понимание, однако строгое доказательство требует:

- Точной спецификации зависимости P_t, R_t от σ_t
- Липшицевых оценок, которые могут не выполняться на практике
- Анализа накопления ошибок, который нами не завершён

⁷⁷Говоря простым языком: это как рынок, где каждый продавец и покупатель пытается перехитрить другого. Чем умнее участники, тем ближе цена к «справедливой». В итоге получается, что хитрить становится невыгодно — все и так торгуют по честной цене.

⁷⁸Говоря простым языком: ограничения работы — это как в любом деле: мы честно говорим, что не всё ещё доказано и не всё работает идеально. Наука — это процесс, а не готовый ответ. В этом разделе мы говорим: «Вот чего мы пока не знаем, и вот что может пойти не так».

Без этого доказательства мы не можем гарантировать сходимость алгоритма обучения или даже наличие прогресса.

Равновесие в рыночной игре не охарактеризовано. Мы знаем, что равновесия существуют (по стандартным теоремам о неподвижной точке), но не охарактеризовали их. Возможно, равновесие обладает нежелательными свойствами — например, поставщики ликвидности выводят средства, или трейдеры избегают пул.

Семейство ОКС может иметь патологии при экстремальных параметрах. Мы доказали корректное поведение при $\kappa = 0$ и $\kappa = 1$, однако промежуточные значения требуют дополнительного анализа, особенно вблизи $\kappa = 1$, где становится возможным полное исчерпание резервов.

9.2 Практические вызовы

Проблема холодного старта. Новый пул не имеет данных для обучения. Каким должно быть начальное значение κ ? Через какое время обучение начнёт давать полезную адаптацию? В течение этого периода пул может работать неудовлетворительно, отпугивая поставщиков ликвидности.

Вычислительные затраты. По нашим оценкам, один своп требует 2 000–5 000 единиц вычислений (CU) (против $\sim 1 000$ для постоянного производства). В сценариях высокой пропускной способности эти накладные расходы могут быть существенны. Обновления обучения создают дополнительные затраты, хотя их можно обрабатывать пакетно.

Надёжность оракулов. Некоторые признаки состояния (оценки волатильности) требуют данных от оракулов. Отказ оракулов или их манипуляция могут исказить обучение.

Переход к управлению. Существующие пулы используют управление (governance) для изменения параметров. Переход к автономной адаптации требует согласия поставщиков ликвидности. Почему поставщики ликвидности должны доверять алгоритму, который они не понимают?

9.3 Что может пойти не так

Перечислим режимы отказа:

1. Расходимость обучения: Алгоритм Q-обучения может разойтись, осциллируя между экстремальными значениями κ . Ограниченные действия сдерживают ущерб, но не предотвращают плохую производительность.
2. Состязательная манипуляция: Трейдеры могут целенаправленно создавать наблюдения, смещающие обучение. Мы не количественно оценили стоимость подобных атак и не доказали устойчивость к ним.
3. Запаздывание обнаружения режима: Если рыночные условия меняются быстрее, чем адаптируется обучение, пул всегда «отстаёт», используя сегодня вчерашнюю оптимальную кривую.
4. Коррелированные отказы: В условиях кризиса (обвал рынка, потеря привязки стейблкоина) множество агентов могут действовать однотипно, создавая коррелированную нагрузку на механизм адаптации именно тогда, когда корректное поведение наиболее критично.
5. Компрометация сервера x402: HTTP-сервер является единой точкой отказа. Его компрометация может привести к хищению средств или цензуре.

79

9.4 Сравнение с альтернативами

Мы не проводили эмпирическое сравнение АЕХ-402 с альтернативами:

- Curve v2: Использует внутренний оракул и эвристическую перецентрировку. Как наш подход на основе обучения с подкреплением соотносится с ним?

⁷⁹Говоря простым языком: как любой механизм, наш обменник может сломаться. Программа может начать принимать плохие решения, кто-то может попытаться её обмануть, или посредник может выйти из строя. Мы честно перечисляем все эти риски, чтобы их можно было учесть заранее.

- Множественные пулы: Вместо адаптации использовать несколько пулов (один по формуле Uniswap, один по формуле Curve) с оптимальной маршрутизацией. Не проще ли это и столь же эффективно?
- Управление: Традиционное управление может быть медленным, но опирается на человеческое суждение. Действительно ли автономная адаптация лучше?

Ответ на эти вопросы требует моделирования или развёртывания, чего мы не осуществляли.

9.5 Будущая работа

Определим наиболее важные направления:

1. Доказать оценку отслеживания: Завершить анализ Гипотезы 4.5 или определить условия, при которых она не выполняется.
2. Провести обширное моделирование: До развёртывания провести моделирование на исторических данных Uniswap, Curve и других АММ. Измерить фактическое улучшение общественного благосостояния.
3. Реализовать и протестировать интеграцию x402: Построить HTTP-сервер, протестировать с реальными агентами, измерить задержку и частоту отказов.
4. Спроектировать устойчивое обучение: Исследовать устойчивость к состязательным воздействиям. Возможно ли спроектировать механизмы, при которых манипуляция является доказуемо дорогостоящей?
5. Межпульное обучение: Могут ли пулы обмениваться опытом? Это может ускорить обучение и смягчить проблему холодного старта.

10 Обзор литературы

Автоматические маркетмейкеры. Формула постоянного произведения была введена Uniswap [Adams et al., 2020]. StableSwap [Egorov, 2019] оптимизировал её для коррелированных активов. Uniswap v3 [Adams et al., 2021] внедрил концентрированную ликвидность. Balancer [Martinelli and Mushegian, 2019] обобщил подход до взвешенных пулов. Curve v2 [Egorov, 2021] ввёл динамическую перецентрировку — ближайшая предшествующая работа к адаптивным кривым. В отличие от эвристического подхода Curve v2, мы предлагаем адаптацию на основе обучения, однако превосходство не было доказано.

Теория обучения с подкреплением. Сходимость Q-обучения в стационарных марковских процессах принятия решений (МПП) хорошо изучена [Watkins and Dayan, 1992, Even-Dar and Mansour, 2003]. Нестационарные МПП представляют значительно бóльшую сложность; Sutton and Barto [2018] обсуждают отслеживание, но без строгих оценок. Наша Гипотеза 4.5 стремится заполнить этот пробел, но остаётся недоказанной.

Дизайн механизмов. Многоуровневое ценообразование связано с дискриминацией по качеству [Mussa and Rosen, 1978]. Наш анализ (Теорема 5.3) является стандартным; новизна заключается в применении к уровням исполнения АММ.

Интернет-платежи. Протокол x402 [x402 Foundation, 2025] мотивирует нашу работу. Нам не известны предшествующие работы по финансовой инфраструктуре, нативной для протокола x402.

11 Заключение

Мы представили АЕХ-402 — фреймворк для адаптивного автоматического маркетмейкинга.

Наши вклады суммируются следующим образом:

Доказано:

- Статические АММ несут потери общественного благосостояния порядка $\Omega(T)$ при переключении режимов (Теорема 2.5)
- Семейство ОКС обеспечивает корректную интерполяцию кривых с эффективным вычислением свопов (Теорема 3.5)

- Многоуровневый доступ совместим со стимулами при стандартных предположениях (Теорема 5.3)

Предложено:

- Архитектура Q-обучения для ончейн-адаптации
- Интеграция с x402 для агентно-нативного доступа
- Гипотеза об оценке отслеживания для нестационарной сходимости

Не решено:

- Строгие гарантии сходимости обучения
- Устойчивость к состязательным воздействиям
- Эмпирическое сравнение с альтернативами
- Полная реализация интеграции с x402

Тезис данной работы — о том, что АММ должны учиться на собственном опыте — остаётся убедительным, несмотря на указанные пробелы. Рынки меняются; механизмы обмена должны адаптироваться. Вопрос не в том, нужно ли адаптироваться, а в том, как.

Мы предлагаем АЕХ-402 не как готовое решение, а как исследовательскую программу. Теоретический фреймворк частично завершён; практические вызовы существенны; видение автономной, обучающейся, агентно-нативной финансовой инфраструктуры ещё предстоит реализовать.

80

11.1 Исследовательская повестка

В заключение приводим приоритизированную исследовательскую повестку:

1. Год 1: Доказать оценки отслеживания. Провести обширное моделирование. Построить прототип интеграции с x402.
2. Год 2: Развернуть в тестовой сети (testnet). Сравнить с базовыми решениями. Итерировать дизайн обучения.
3. Год 3: Развёртывание в основной сети (mainnet) с защитными механизмами. Накопление реального опыта эксплуатации. Публикация эмпирических результатов.

Мы приглашаем к сотрудничеству по данным проблемам. Агентная экономика наступает; её инфраструктура должна строиться тщательно, с теоретическими основаниями и честным признанием неопределённости.

Список литературы

- H. Adams, N. Zinsmeister, and D. Robinson. Uniswap v2 Core [Uniswap v2: Базовый протокол]. Технический отчёт, Uniswap, 2020.
- H. Adams, N. Zinsmeister, M. Salem, R. Keefer, and D. Robinson. Uniswap v3 Core [Uniswap v3: Базовый протокол]. Технический отчёт, Uniswap, 2021.
- M. Egorov. StableSwap: Efficient Mechanism for Stablecoin Liquidity [StableSwap: Эффективный механизм ликвидности для стейблкоинов]. Технический отчёт, Curve Finance, 2019.
- M. Egorov. Automatic Market-Making with Dynamic Peg [Автоматический маркетмейкинг с динамической привязкой]. Технический отчёт, Curve Finance, 2021.

⁸⁰Говоря простым языком: мы придумали новый тип автоматического обменного пункта, который сам учится работать лучше. Кое-что мы доказали математически, кое-что — только предложили как идею, а кое-что — честно признаём — пока не решено. Это нормально для науки: главное — двигаться вперёд честно.

- x402 Foundation. x402: An Open Standard for Internet-Native Payments [x402: Открытый стандарт интернет-нативных платежей]. Технический отчёт, Coinbase, Cloudflare, 2025.
- F. Martinelli and N. Mushegian. Balancer Whitepaper [Техническая документация Balancer]. Технический отчёт, Balancer Labs, 2019.
- C. J. C. H. Watkins and P. Dayan. Q-обучение (Q-learning). *Machine Learning*, 8:279–292, 1992.
- R. S. Sutton and A. G. Barto. Reinforcement Learning: An Introduction [Обучение с подкреплением: Введение]. MIT Press, 2-е издание, 2018.
- E. Even-Dar and Y. Mansour. Learning Rates for Q-learning [Скорости обучения для Q-обучения]. *Journal of Machine Learning Research*, 5:1–25, 2003.
- T. M. Cover and J. A. Thomas. Elements of Information Theory [Элементы теории информации]. Wiley, 2-е издание, 2006.
- M. Mussa and S. Rosen. Monopoly and Product Quality [Монополия и качество продукции]. *Journal of Economic Theory*, 18:301–317, 1978.
- P. Daian, S. Goldfeder, T. Kell, Y. Li, X. Zhao, I. Bentov, L. Breidenbach, and A. Juels. Flash Boys 2.0: Frontrunning in Decentralized Exchanges [Flash Boys 2.0: Фронтраннинг на децентрализованных биржах]. В сб. *IEEE S&P*, 2020.
- D. Minarsch, M. Hosseini, M. Favorito, and J. Ward. Autonomous Economic Agents as a Second Layer Technology for Blockchains: Framework Introduction and Use-Case Demonstration [Автономные экономические агенты как технология второго уровня для блокчейнов: Представление фреймворка и демонстрация примеров использования]. В сб. *Crypto Valley Conference on Blockchain Technology (CVCBT)*, IEEE, 2020.
- L. Lamport, R. Shostak, and M. Pease. The Byzantine Generals Problem [Задача византийских генералов]. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 4(3):382–401, 1982.
- Y. Shoham and K. Leyton-Brown. Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations [Мультиагентные системы: Алгоритмические, теоретико-игровые и логические основания]. Cambridge University Press, 2008.
- M. Wooldridge. An Introduction to MultiAgent Systems [Введение в мультиагентные системы]. Wiley, 2-е издание, 2009.
- OpenSVM. AEAMCP: Solana AI Registries for Agent and MCP Server Discovery [AEAMCP: Реестры ИИ в сети Solana для обнаружения агентов и серверов MCP]. Технический отчёт, OpenSVM, 2025. <https://aea.network>
- Linux Foundation. A2A Protocol: An Open Standard for Agent-to-Agent Communication [Протокол A2A: Открытый стандарт межагентной коммуникации]. Техническая спецификация, 2025. <https://a2a-protocol.org>

А Детали вычисления свопов в рамках ОКС

Приводим дополнительные подробности итерации Ньютона–Рафсона для вычисления обменных операций.

А.1 Постановка задачи

Дано: резервы (x, y) , кривизна κ , масштаб D , входной объём Δx . Найти: выходной объём Δy такой, что $\mathcal{I}_\kappa(x + \Delta x, y - \Delta y) = 1$.

Пусть $x' = x + \Delta x$ (известно) и $y' = y - \Delta y$ (неизвестно). Определим:

$$f(y') = \left(\frac{x'y'}{D^2}\right)^{1-\kappa} \cdot \left(\frac{x'+y'}{2D}\right)^{2\kappa} - 1 \quad (47)$$

Ищем y' такое, что $f(y') = 0$.

А.2 Итерационное обновление по методу Ньютона–Рафсона

Производная имеет вид:

$$f'(y') = \mathcal{I}_\kappa(x', y') \cdot \left[\frac{(1 - \kappa)}{y'} + \frac{2\kappa}{x' + y'} \right] \quad (48)$$

Обновление по методу Ньютона:

$$y'_{n+1} = y'_n - \frac{f(y'_n)}{f'(y'_n)} \quad (49)$$

А.3 Инициализация

Начальное приближение берётся из решения для постоянного произведения:

$$y'_0 = \frac{xy}{x'} = \frac{xy}{x + \Delta x} \quad (50)$$

Это решение является точным при $\kappa = 0$ и даёт разумную начальную точку для других значений κ .

А.4 Критерий сходимости

Итерации проводятся до выполнения условия $|f(y'_n)| < \epsilon$ при допуске $\epsilon = 10^{-12}$ (достаточном для 64-битной точности).

А.5 Число итераций

На практике для сходимости обычно требуется:

- $\kappa \in [0, 0,3]$: 3–5 итераций
- $\kappa \in [0,3, 0,7]$: 4–7 итераций
- $\kappa \in [0,7, 0,95]$: 6–10 итераций

Большие значения κ требуют большего числа итераций, поскольку начальное приближение по формуле постоянного произведения оказывается дальше от истинного решения.

В Доказательство Теоремы 2.5

Приводим полное доказательство нижней оценки для статических кривых.

Доказательство. Пусть σ_t обозначает режим в момент времени t , причём $\sigma_t \in \{\sigma_H, \sigma_L\}$. Процесс переключения режимов является эргодической марковской цепью с матрицей переходов P .

Шаг 1: Стационарное распределение

Стационарное распределение удовлетворяет $\pi P = \pi$. Решая:

$$\pi_H = \frac{q}{p + q}, \quad \pi_L = \frac{p}{p + q} \quad (51)$$

По эргодической теореме для любой ограниченной функции g :

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T g(\sigma_t) dt = \pi_H g(\sigma_H) + \pi_L g(\sigma_L) \quad \text{п.н.} \quad (52)$$

⁸¹Говоря простым языком: у нас есть обменный пункт с двумя валютами. Мы знаем, сколько валюты вкладываем, и нужно посчитать, сколько другой валюты получим. Это как уравнение, которое мы решаем методом последовательных приближений — каждый шаг приближает нас к точному ответу.

Шаг 2: Декомпозиция благосостояния

Для любой статической кривой c :

$$\mathbb{E} \left[\int_0^T [W(c^*(\sigma_t), \sigma_t) - W(c, \sigma_t)] dt \right] = T \cdot [\pi_H \epsilon_H(c) + \pi_L \epsilon_L(c)] + o(T) \quad (53)$$

где $\epsilon_\sigma(c) = W(c^*(\sigma), \sigma) - W(c, \sigma) \geq 0$.

Шаг 3: Невырожденность

Поскольку $c^*(\sigma_H) \neq c^*(\sigma_L)$ по предположению, для любого фиксированного c по меньшей мере одна из величин $\epsilon_H(c)$ или $\epsilon_L(c)$ строго положительна.

Пусть $\delta(c) = \min\{\pi_H \epsilon_H(c), \pi_L \epsilon_L(c)\}$. Имеем $\delta(c) > 0$ для всех c .

Шаг 4: Равномерная нижняя оценка

Определим $\delta = \inf_c \delta(c)$. Поскольку пространство кривых компактно и $\delta(c)$ непрерывна, инфимум достигается и $\delta > 0$.

Следовательно:

$$\mathbb{E}[\mathcal{G}(c, T)] \geq \delta \cdot T \quad (54)$$

для всех статических кривых c . □

82

С Детали кодирования состояний

Приводим подробности предлагаемого кодирования состояний для Q-обучения.

С.1 Определения признаков

Категория волатильности: Вычисляется на основе недавних ценовых изменений. Пусть $r_t = \log(p_t/p_{t-1})$ — логарифмические доходности. Определим:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} r_{t-i}^2} \quad (55)$$

Категоризация: низкая ($\hat{\sigma} < \sigma_L$), средняя, высокая ($\hat{\sigma} > \sigma_H$).

Категория тренда: Вычисляется на основе направления цены. Пусть $\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} r_{t-i}$. Категоризация: снижение ($\bar{r} < -\delta$), боковое движение, рост ($\bar{r} > \delta$).

Категория спреда: Вычисляется на основе спреда покупки–продажи или дисбаланса пула. Пусть $\text{imb} = |x - y|/(x + y)$ — показатель дисбаланса. Категоризация: узкий ($\text{imb} < \epsilon_1$), средний, широкий ($\text{imb} > \epsilon_2$).

83

С.2 Выбор пороговых значений

Пороговые значения ($\sigma_L, \sigma_H, \delta, \epsilon_1, \epsilon_2$) должны быть откалиброваны по историческим данным для достижения приблизительно равномерного распределения по категориям. Это эмпирический проектный выбор.

С.3 Частота обновления

Состояние следует пересчитывать не чаще одного раза за блок (400 мс в сети Solana). Более частые обновления расходуют вычислительные ресурсы впустую; менее частые — упускают информацию.

⁸²Говоря простым языком: мы математически доказали, что любой «фиксированный» обменный курс (который не меняется) будет со временем терять всё больше денег по сравнению с «идеальным» курсом. Чем дольше работает система — тем больше потери. Это означает, что адаптация — не роскошь, а необходимость.

⁸³Говоря простым языком: мы описываем рыночную ситуацию тремя простыми характеристиками: насколько сильно «скачет» цена (волатильность), в какую сторону она движется (тренд) и насколько велик разрыв между ценами покупки и продажи (спред). Каждая характеристика принимает одно из трёх значений: низкое, среднее, высокое. Итого: $3 \times 3 \times 3 = 27$ возможных состояний рынка.

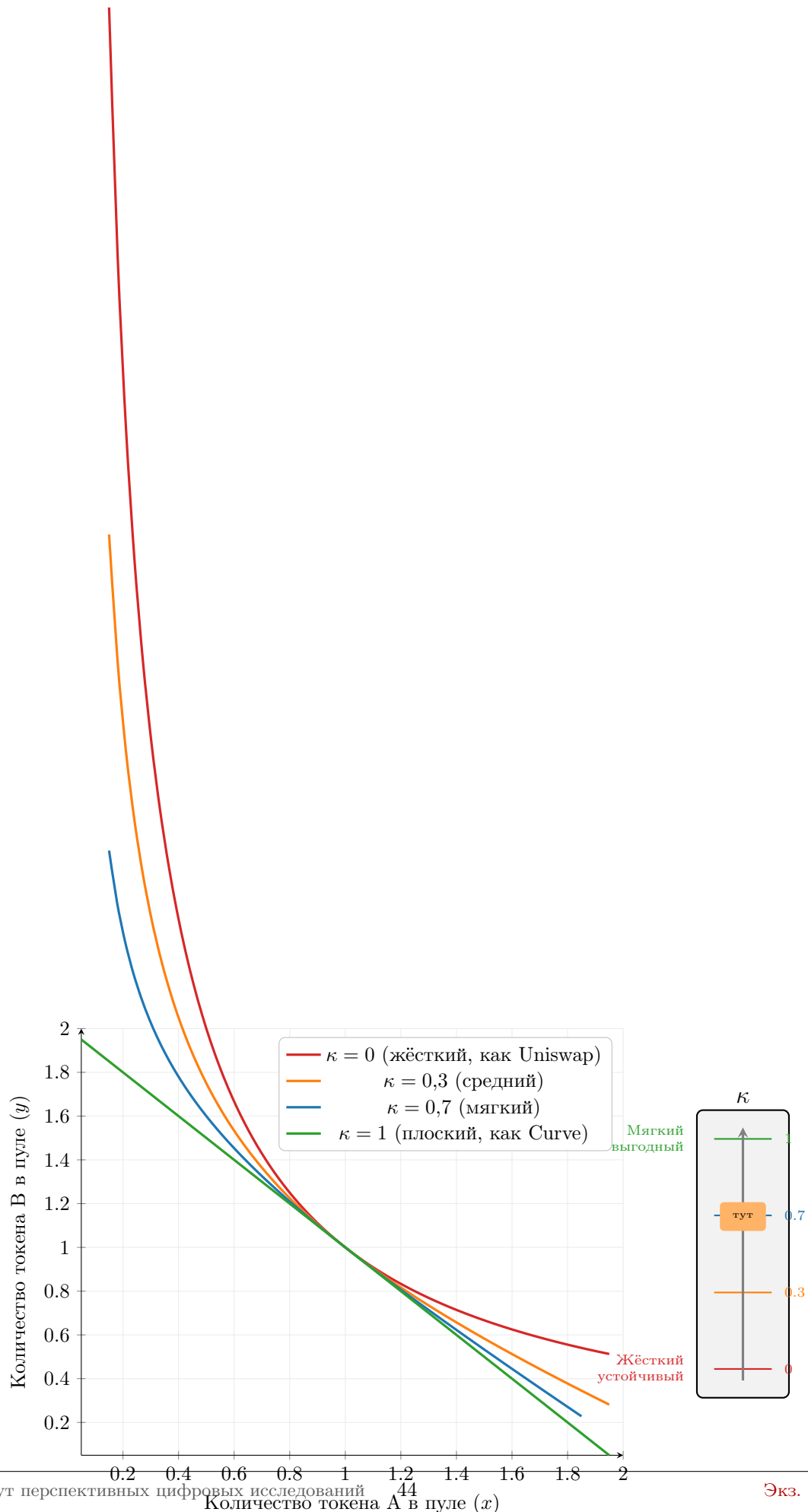


Рис. 5: Семейство кривых ОКС: параметр κ плавно меняет форму кривой от крутой гиперболы ($\kappa = 0$, жёсткий курс) до почти прямой линии ($\kappa = 1$, мягкий курс). Ручка настройки справа показывает аналогично с регулятором.

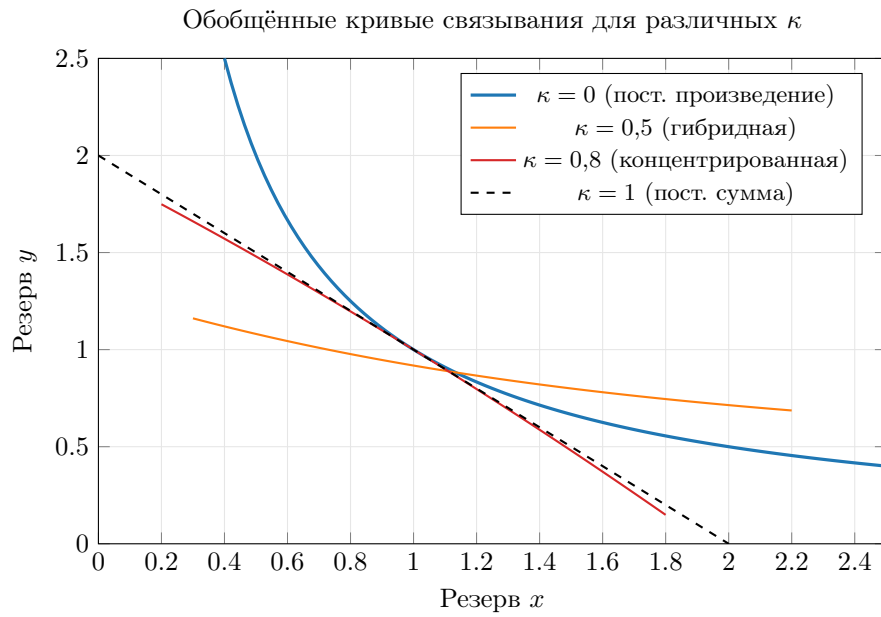


Рис. 6: Линии уровня обобщённой кривой связывания при $D = 1$ и различных κ . С ростом κ кривая выравнивается вблизи диагонали (обеспечивая концентрированную ликвидность), но достигает пересечений с осями (допуская истощение резервов).

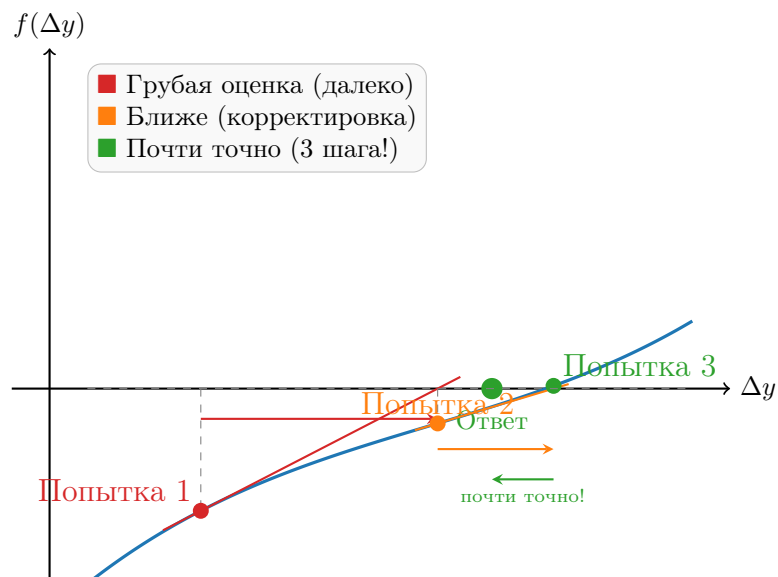


Рис. 7: Метод Ньютона–Рафсона: компьютер быстро находит правильный курс обмена за 3–5 шагов. Каждая «попытка» вдвое точнее предыдущей.

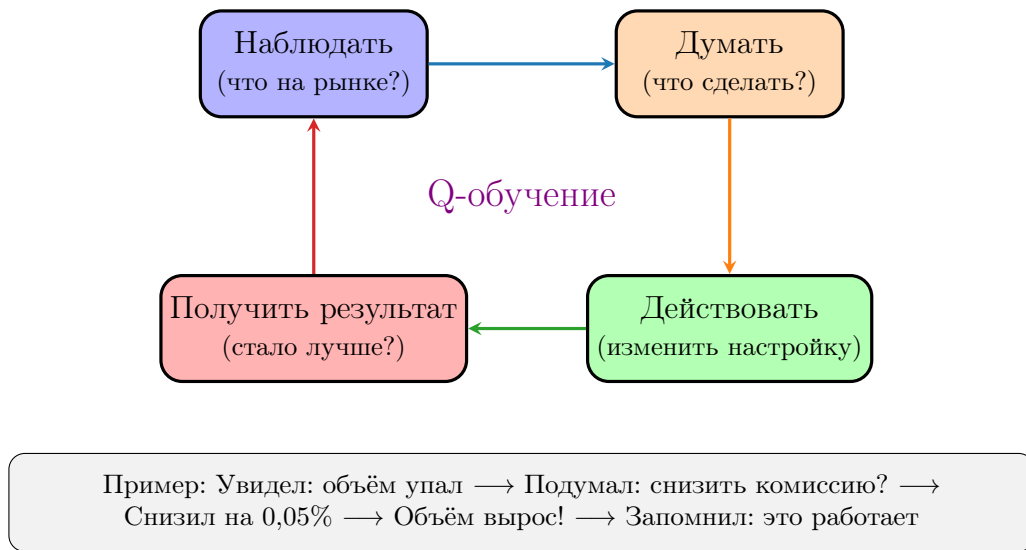


Рис. 8: Цикл обучения с подкреплением: робот учится на своих действиях, наблюдая результат каждого решения и постепенно улучшая стратегию управления обменником.

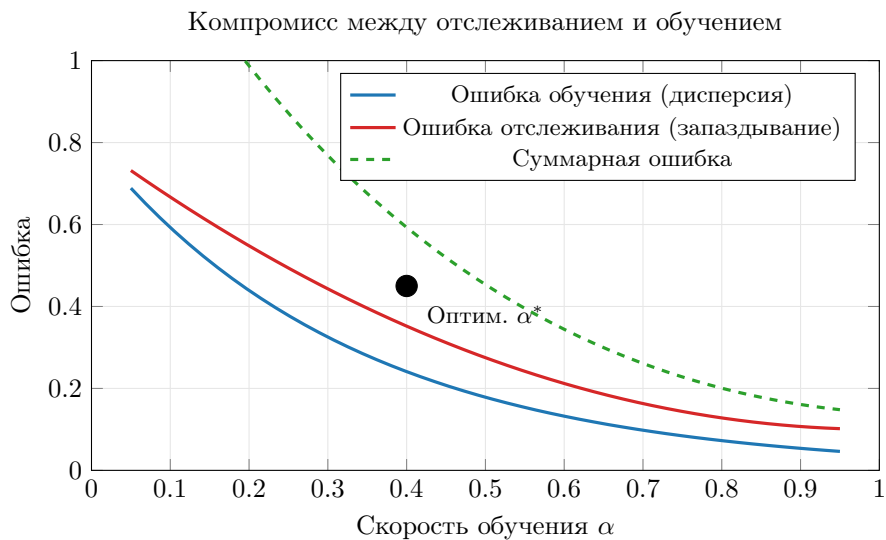


Рис. 9: Фундаментальный компромисс в адаптивном обучении. Низкая скорость обучения даёт стабильные, но запаздывающие оценки. Высокая скорость обучения обеспечивает быстрое отслеживание, но с высокой дисперсией. Оптимальная скорость уравнивает обе силы.

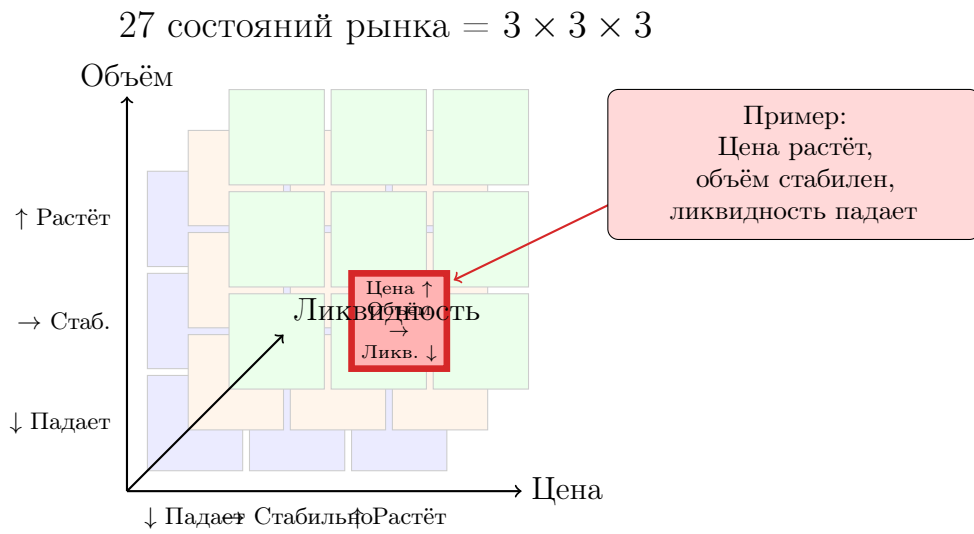


Рис. 10: Пространство состояний: робот различает 27 ситуаций на рынке, комбинируя три показателя (цена, объём, ликвидность), каждый из которых может падать, быть стабильным или расти.

9 рычагов управления

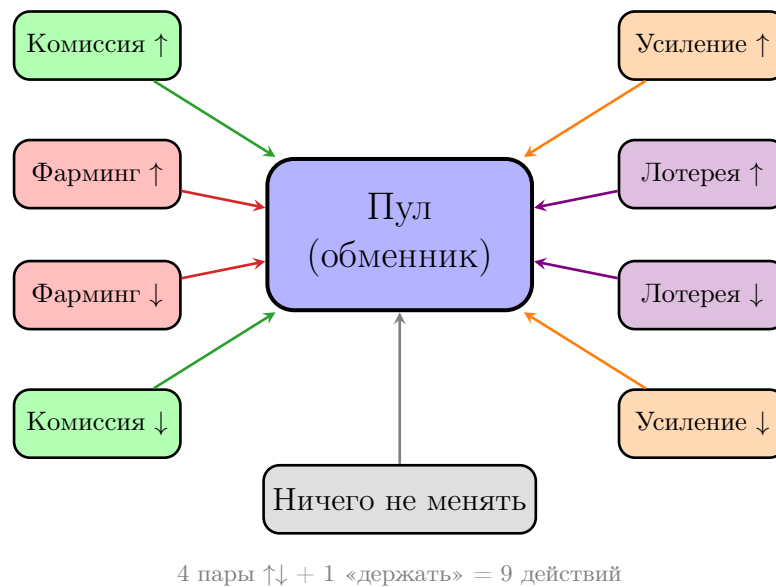


Рис. 11: Действия робота: 9 способов настроить обменник — четыре пары рычагов (увеличить/уменьшить) плюс возможность ничего не менять.

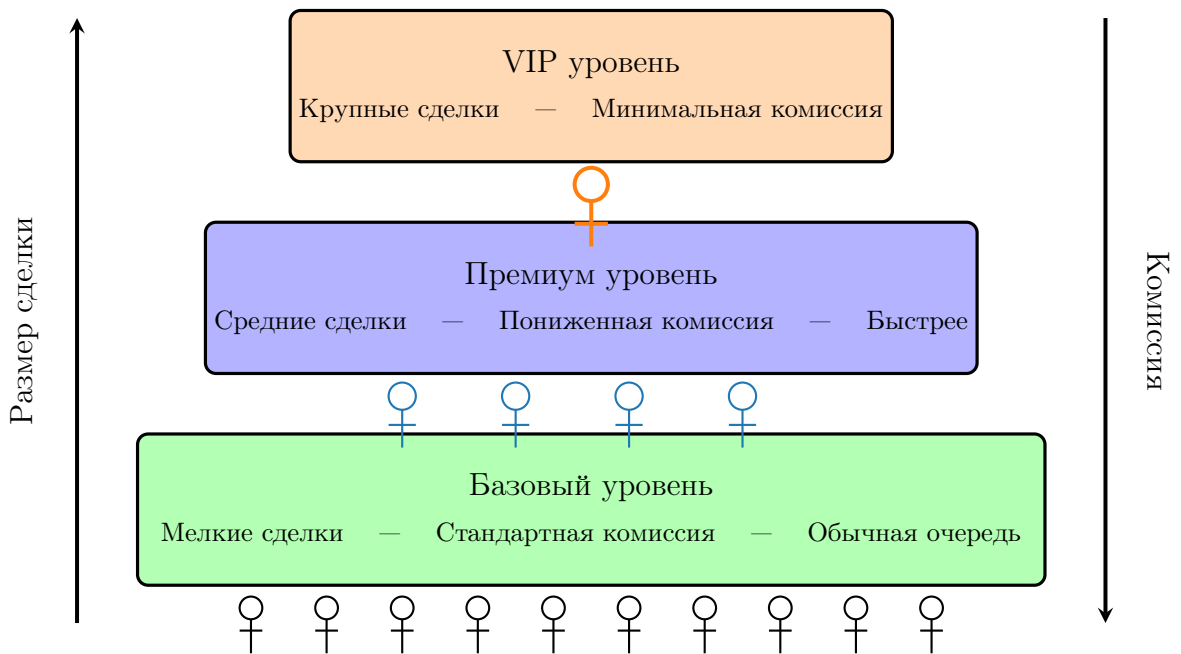


Рис. 12: Многоуровневый доступ: чем больше торгуешь, тем меньше платишь. Базовый уровень доступен всем, премиум — для средних трейдеров, VIP — для крупных операций.

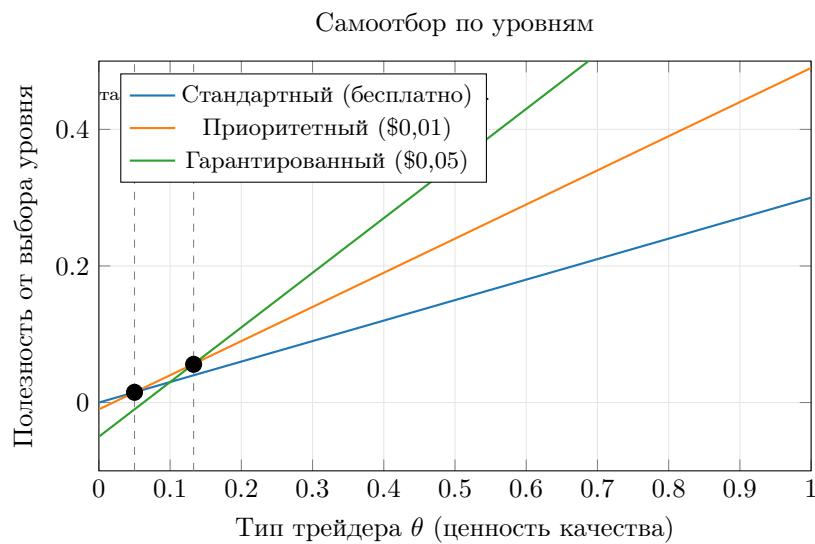


Рис. 13: Полезность по уровням как функция типа трейдера. Вертикальные пунктирные линии показывают пороги самоотбора. Каждый тип оптимально выбирает уровень, на котором его полезность максимальна.

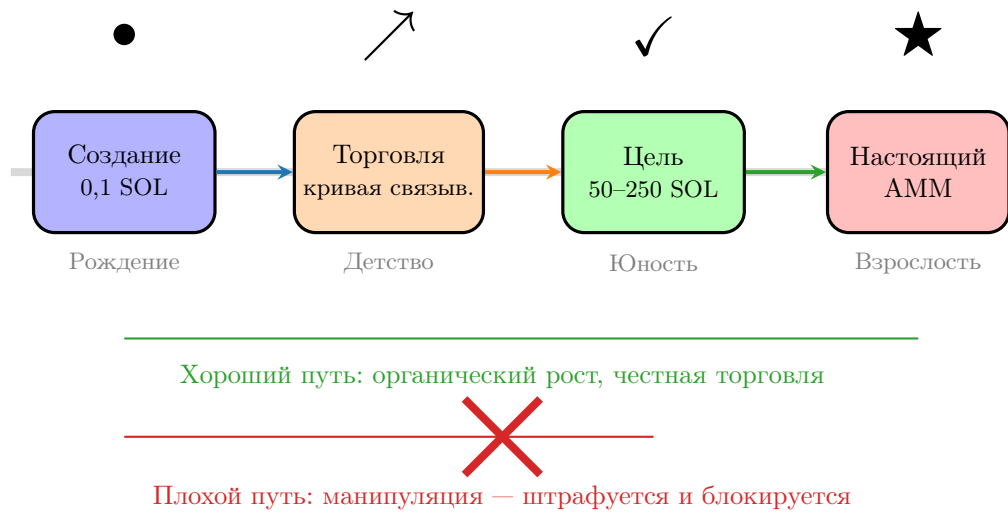


Рис. 14: Путь токена: от виртуального пула до полноценного АММ. Органический рост вознаграждается, манипуляции штрафуются.

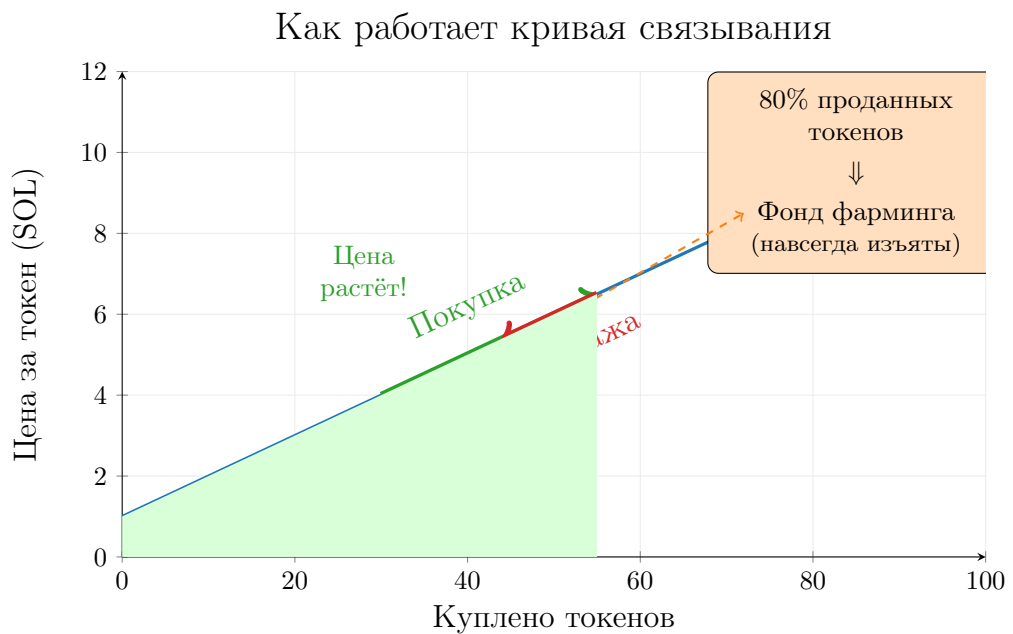


Рис. 15: Кривая связывания: чем больше покупают, тем дороже токен. При продаже цена снижается, но 80% проданных токенов навсегда изымаются в фонд фарминга.

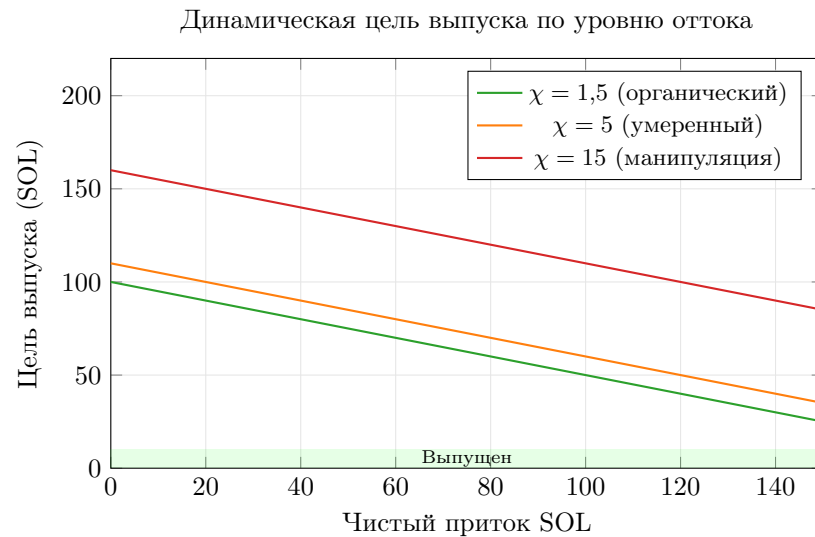


Рис. 16: Цель выпуска как функция чистого притока для различных уровней оттока. Манипуляция ($\chi = 15$) значительно повышает цель, затрудняя выпуск. Органический рост ($\chi = 1,5$) получает преимущество от пониженных целей.

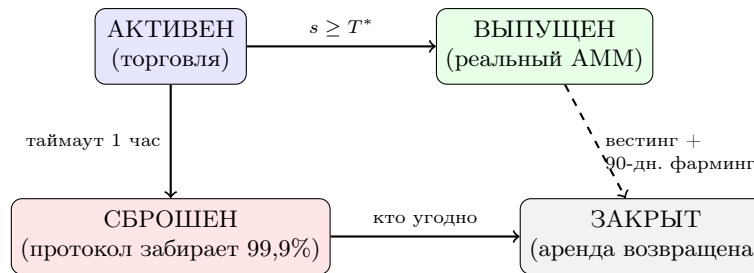


Рис. 17: Конечный автомат виртуального пула. Пулы должны выпуститься в течение 1 часа, иначе происходит сброс, при котором протокол забирает 99,9% собранных SOL.

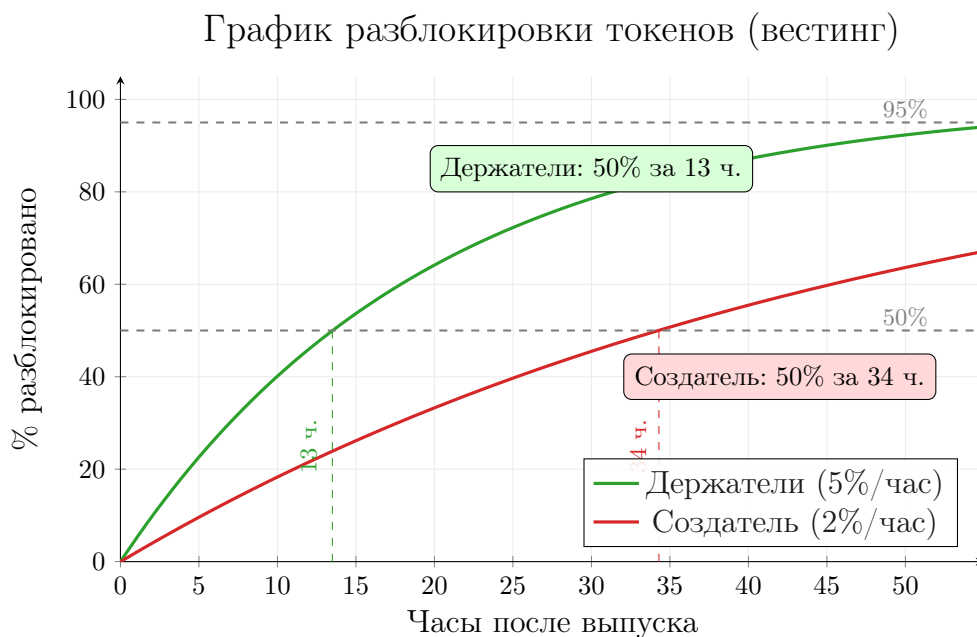


Рис. 18: Вестинг: токены разблокируются постепенно. Держатели получают свои токены быстрее (5% в час), создатель — медленнее всех (2% в час), что защищает от мгновенного сброса.

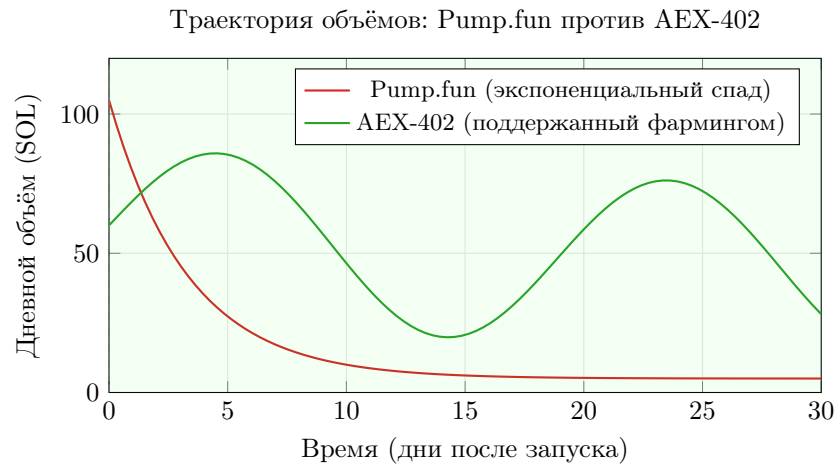


Рис. 19: Стилизованные траектории объёмов. Токены Pump.fun испытывают стремительный спад объёмов после выпуска, поскольку импульс кривой связывания исчезает. Конкурентный фарминг AEX-402 поддерживает повышенный, осциллирующий объём в течение 90 дней.

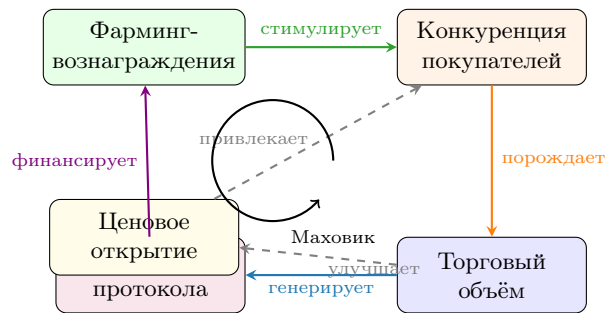


Рис. 20: Маховик объёмов. Фарминг-вознаграждения создают конкуренцию; конкуренция порождает объём; объём генерирует комиссии; комиссии могут финансировать дополнительные вознаграждения. Цикл самоусиливается в течение 90 дней.

Ожидаемая ценность относительно торговых издержек (вознаграждение окна = 1000 токенов @ \$0,10)

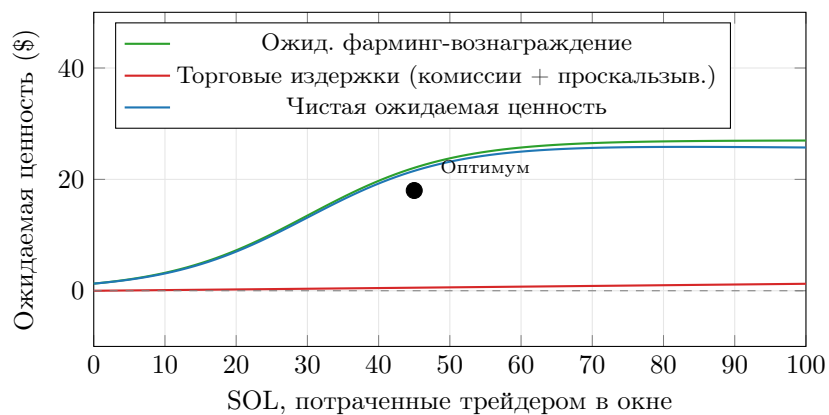


Рис. 21: Анализ ожидаемой ценности для одного окна. Трейдеры оптимизируют затраты в точке, где предельное вознаграждение равно предельным издержкам. Форма кривой создаёт «зону оптимальности» в районе 40–50 SOL для данной параметризации.

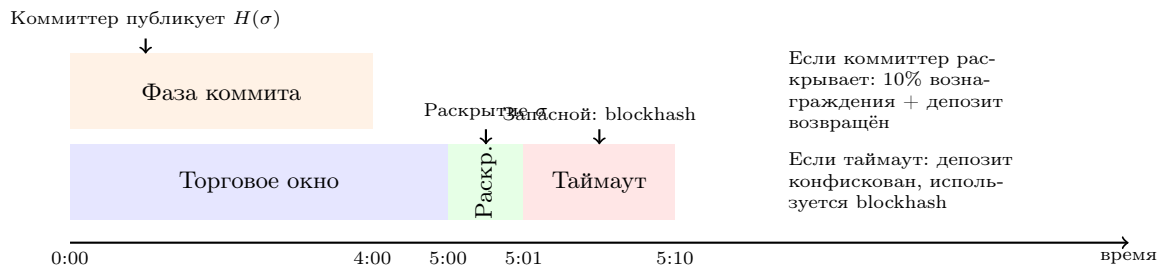


Рис. 22: Временная шкала коммит-раскрытия для случайности фарминга. Коммиттеры обязаны отправить коммит до того, как станет известен финальный топ-10, что предотвращает манипуляции.

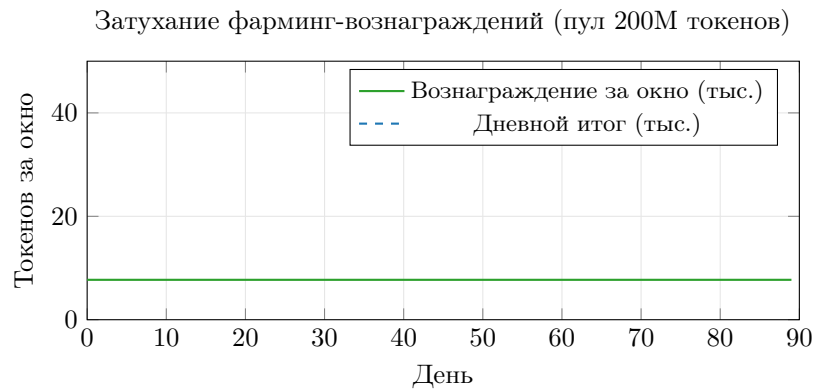
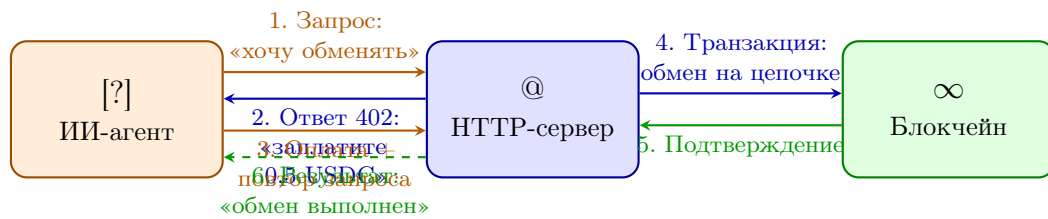


Рис. 23: При распределении «оставшийся пул / оставшиеся окна» вознаграждение за окно постоянно и составляет ~7716 токенов. Это создаёт стабильные стимулы на протяжении всего 90-дневного периода.



Как автомат с напитками: бросил монетку — получил товар.
Без регистрации, без паролей, без ожидания.

Рис. 24: Протокол x402: агент платит за обмен как в автомате с напитками. ИИI-агент отправляет HTTP-запрос, получает требование оплаты, платит и получает результат обмена — всё автоматически.

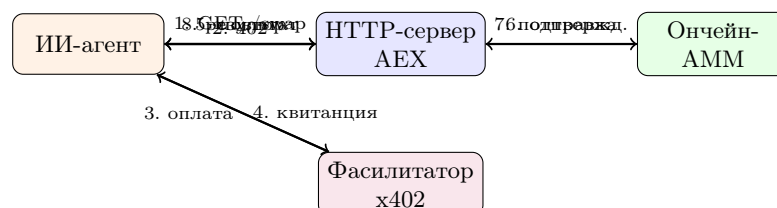


Рис. 25: Предлагаемая схема интеграции с x402. HTTP-сервер является внецепочечным компонентом, выступающим посредником между агентами и ончейн-АММ.

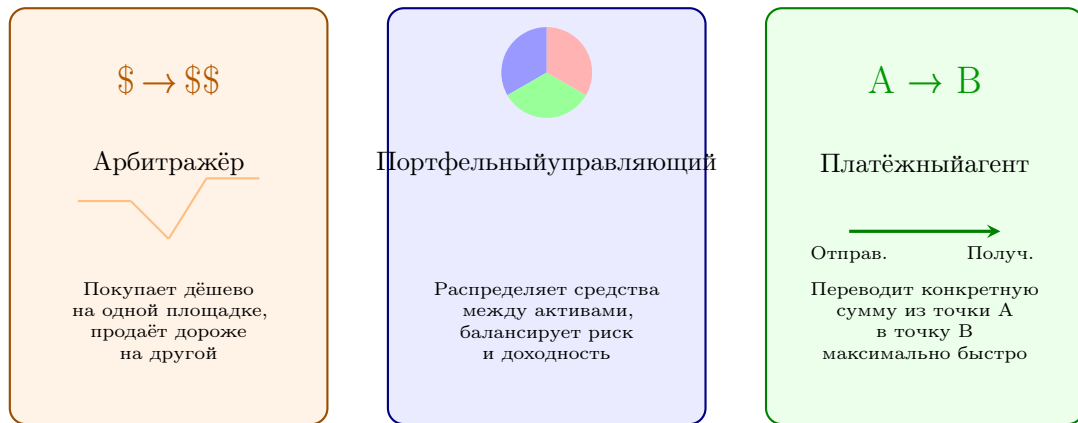


Рис. 26: Три типа автономных агентов в экосистеме АЕХ-402. Каждый тип имеет свою стратегию и по-разному оценивает результаты обмена, что создаёт разнообразие спроса на услуги пула.

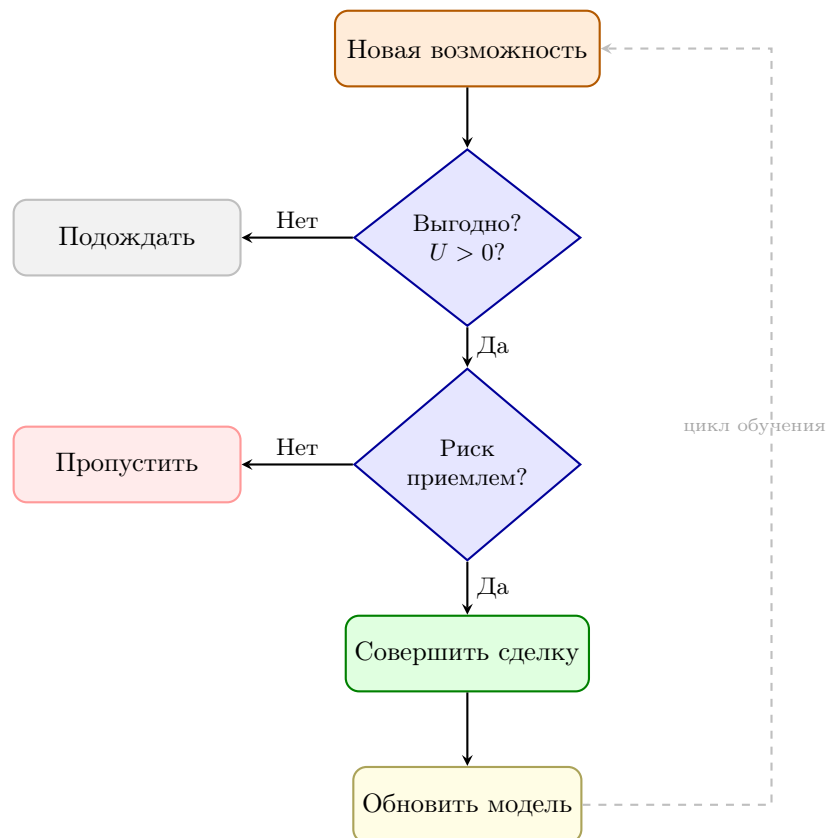


Рис. 27: Дерево решений автономного экономического агента. На каждом шаге агент проверяет: выгодна ли сделка? Приемлем ли риск? Если да — совершает обмен и обновляет свою модель на основе результата.

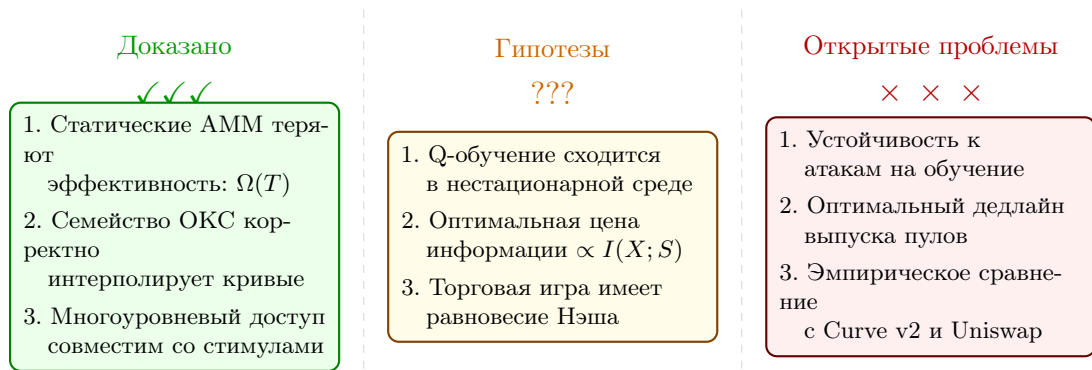


Рис. 28: Честная оценка: доказанные результаты, гипотезы и нерешённые задачи. Зелёное — строго доказано. Жёлтое — правдоподобно, но без строгого доказательства. Красное — требует дальнейших исследований.



Рис. 29: Общая архитектура протокола АЕХ-402. Шесть ключевых компонентов объединены вокруг единого ядра: математические кривые, машинное обучение, виртуальные пулы для запуска токенов, HTTP-протокол для агентов, голосование и защитные механизмы.